

05.23.07 Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

УДК 502/504:627.82:532.52

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-3-55-62

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ
ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ
УДАРНЫХ ВОЛН И НЕСТАЦИОНАРНЫХ НАГРУЗОК****АНДРЕЕВ ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**, канд. техн. наук, доцент

andreev-rf@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49. Россия

На этапе жизненного цикла обеспечение эксплуатационной надежности и безопасности напорных гидротехнических сооружений является актуальной задачей. Одной из серьезных угроз является разрушение гидротехнических сооружений путем воздействия на них нестационарных нагрузок, направленных взрывов в непосредственной близости от сооружений либо на их поверхности. Серьезную угрозу для гидротехнических сооружений представляет воздействие ударных волн. Импульсное кратковременное воздействие на твердые поверхности гидротехнических сооружений или на водную среду характеризует специфику рассматриваемой задачи как нестационарность процесса движения сплошных сред, в которые за короткий временной интервал может высвободиться объем энергии, способный деформировать или полностью их разрушить. Такого рода сценарии могут происходить либо в непосредственной близости от гидротехнического сооружения, либо в результате соударения твердых тел о его поверхности. Плотные и жидкие среды имеют ряд особенностей при ударноволновом воздействии. Вода в верхнем бьефе гидротехнического сооружения и ее теле является сложной жидкостью, потому что многие ее характеристики существенным образом отличаются по своей величине от аналогичных характеристик других жидкостей либо имеют так называемые аномалии на зависимостях от давления и температуры.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, грунтовые плотины, физико-механические свойства грунтов, ударная волна, обтекаемая волна, давление, взрыв, детонация, нестационарные нагрузки, состояние вещества, высокопараметрические нагрузки

Формат цитирования: Андреев Е.В. Численное исследование состояния грунтовых плотин в результате воздействия ударных волн и нестационарных нагрузок // Природообустройство. – 2021. – № 3. – С. 55-62. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-3-55-62.

© Андреев Е.В., 2021

Scientific article

**NUMERICAL STUDY OF THE STATE OF SOIL DAMS AS A RESULT
OF IMPACT OF SHOCK WAVES AND UNSTEADY LOADS****ANDREEV EVGENIY VLDIMIROVICH**, candidate of technical sciences, associate professor

andreev-rf@mail.ru

Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya, 49. Russia

At the stage of the life cycle, ensuring the operational reliability and safety of pressure head hydraulic structures is an urgent task. One of the serious threats at the present stage is the destruction of hydraulic structures by the impact of non-stationary loads, by directed explosions in the immediate vicinity of the structures or on their surface. Shock waves pose a serious threat to hydraulic structures. Impulse short-term impact on the solid surfaces of hydraulic structures or on the aquatic environment characterizes the specifics of the problem under consideration, as the nonstationary of the process of motion of continuous media into which, in a short time interval, a volume of energy can be released that can deform or completely destroy them. Scenarios of this kind can occur either in the immediate vicinity of a hydraulic structure or as a result of the collision of solid bodies on its surface. Water upstream of the hydro technical structure and its body is a complex liquid because many of its characteristics differ significantly in size from similar characteristics of other liquids or have so-called anomalies on pressure and temperature dependences.

Keywords: *hydraulic structures, earth dams, physical and mechanical properties of soils, shock wave, streamlined wave, pressure explosion, detonation, non-stationary loads, state of matter*

Format of citation: *Andreev E.V. Numerical study of the state of soil dams as a result of impact of shock waves and unsteady loads // Prirodoobustrojstvo. – 2021. – № 3. – S. 55-62. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-3-55-62.*

Введение. В последние годы наблюдается рост чрезвычайных происшествий, связанных как с влиянием природного и техногенного характера, так и с умышленными действиями террористического характера, направленными на нанесение ущерба критически важным объектам инфраструктуры. В результате повреждений и разрушений напорных гидротехнических сооружений может возникнуть затопление заселенных и освоенных территорий с человеческими жертвами и нанесением прямого материального ущерба. Анализ уровня воздействия на гидротехнические сооружения и предотвращение таких происшествий являются на сегодняшний день актуальными задачами.

Высокую степень опасности для гидротехнических сооружений представляет воздействие ударных волн, спровоцированное взрывами на поверхности или в теле сооружения. Мощные источники импульсного воздействия на твердые или жидкие среды вблизи гидротехнического сооружения или на его поверхности определяют специфику задачи как нестационарность процесса движения сплошных и пористых сред, в которых может одновременно концентрироваться большое количество энергии. Такие сценарии могут протекать либо в ближней зоне высвобождения энергии (взрыва), либо при соударении твердых тел о поверхности гидротехнических сооружений на высоких скоростях.

В связи с рядом ограничений по условиям прочности экспериментальных

установок и эффектов термического воздействия актуальными являются методы экспериментального импульсного нагружения, что позволяет получить достоверные результаты о степени воздействия ударных волн на конструкции гидротехнических сооружений формирующимися в газообразной, твердой и жидкой средах.

Материалы и методы. Импульсные методики, в результате которых образуется высокая плотность высвобождаемой энергии, можно подразделить на два основных направления: в первом рассматривается воздействие на гидротехнические сооружения ударных волн, а во втором – воздействие с высокой плотностью электромагнитной энергии. В первом случае нагружение гидротехнических сооружений происходит по средствам высвобождения энергии продуктами детонации, ударными волнами регулярного и нерегулярного характера, которые формируются при взрывах в непосредственной близости с гидротехническим сооружением в водной, воздушной средах или непосредственно на его поверхности. Во втором случае рассматриваются процессы, которые возникают при кумуляции электромагнитной энергии в результате взрыва магнитокумулятивных генераторов [1, 2].

Диапазоны давлений, которые могут быть достигнуты при статических и динамических нагружениях, протекающие в соответствующих масштабах времени, можно представить в виде шкалы (рис. 1).

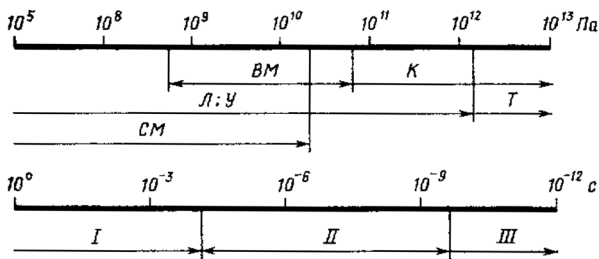


Рис. 1. Шкала давлений и временной масштаб в случае динамического нагружения:

ВМ – взрывные методики;

СМ – статические методики;

У и Л – лазерное и ударное воздействие;

К – кумуляция;

Т – процессы термоядерного характера;

I – метание образцов продуктами горения;

II – распространение ударной волны в плотной среде, разрушение в результате динамического воздействия;

III – воздействие в результате падения метеорита, термоядерные процессы

Fig. 1. Pressure scale and time scale in the case of dynamic loading:

M – explosive techniques;

CM – static techniques;

U and L – laser and shock impact;

K – cumulation; T – thermonuclear processes;

I – throwing of samples with combustion products;

II-spreading of the shock wave in the dense environment, destruction as a result of the dynamic impact;

III- impact as a result of meteorite fall, thermonuclear processes

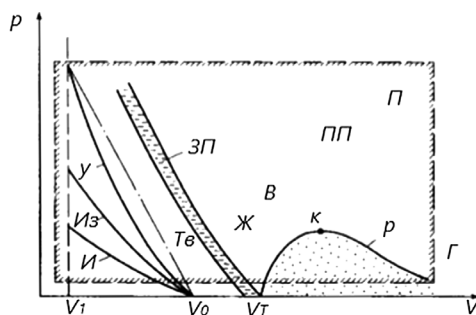


Рис. 2. Фазовая диаграмма:

И – изотерма; Из – изотропа;

У – ударная адиабата;

Тв – твердое вещество; ЗП – зона плавления;

Р – кривая равновесия «Жидкость-пар»;

Ж – жидкость; П – плазма;

Vt – тройная точка; ПП – плотная плазма;

к – критическая точка; Г – газ

Fig. 2. Phase chart:

I – isotherma; Iz – isotrope;

U – shock adiabat; Tv – solid matter;

ЗП – melting zone;

P – liquid-steam equilibrium curve;

Ж – a liquid; П – plasma; Vt-triple point;

ПП – dense plasma; K – critical point; Г – gas

Физическое состояние области гидротехнического сооружения в зоне давлений до 10^2 ГПа обусловлено типом симметрии кристаллической решетки, в том числе характером заполнения электронных энергетических зон рассматриваемой области и отдельных элементов. Если рассматривать область жидкого состояния, то для построения работоспособных физических моделей необходимо учесть значительный вклад кратковременно действующего отталкивания в потенциале взаимодействия между частицами. При рассмотрении области пониженных температур и малых плотностей в газовой среде можно пренебречь взаимодействием частиц, а уравнение состояния выразить в рамках модели реального газа. С увеличением температуры и давления значимый вклад начинают вносить процессы диссоциации и ионизации, которые в свою очередь учитываются в уравнении состояния реального газа путем внедрения коэффициента эффективности адиабаты [3].

В случае образования плазмы в результате взрыва на поверхности гидротехнического сооружения значительную роль в процессе играют силы кулоновского взаимодействия. В свою очередь, в области низкотемпературной плазмы важно учесть значимость квантовых явлений. Однако стоит подчеркнуть, что в случае последовательного увеличения показателей давления на область гидротехнического сооружения при высокой плотности тела грунтового сооружения структура вещества упрощается и становится квазиоднородно распределенной с электронной плотностью внутри элементарных ячеек Вагнера-Зейтца, так как электронные оболочки атомов в этих условиях становятся «раздавленными». В данном случае происходит упрощение термодинамического описания вещества, уравнение состояния которого представляется в виде модели электронного газа.

Математическое моделирование физических процессов, сопровождаемых, высокоскоростными импульсами можно описать уравнениями механики сплошной среды, учитывая их нестационарность в простой дифференциальной форме и закон сохранения массы, энергии и импульса. Так же, с помощью термодинамических и реологических моделей, можно описать механические свойства плотной среды тела гидротехнического сооружения, то есть физическими соотношениями и уравнениями состояния.

Можно сказать, что специфика рассматриваемых задач состоит в грамотном обосновании и выборе подходящих термодинамических соотношений, то есть уравнений состояния тела грунтового гидротехнического сооружения как сплошной среды. Данные уравнения отражают фундаментальные характеристики сплошной среды рассматриваемого грунтового гидротехнического сооружения и во многом определяют применимость обобщенного аппарата механики сплошной среды к определенным физическим системам. В большинстве случаев достаточно сложно с теоретической точки зрения адекватно описать термодинамические свойства рассматриваемого вещества в так называемых условиях большой неидеальности, нестационарности и неравновесности. В результате достаточно широкое распространение получило применение данных, полученных экспериментальным способом, для расчета численных параметров в функциональных зависимостях [3].

Построение уравнений состояния, учитывающих фазовые переходы, заключается в применении соотношений, которые описывают какие-либо изменения во времени так называемой свободной энергии F соответственно для разных типов сред. Это объясняется тем, что термодинамические параметры можно легко определить через свободную энергию: например, давление, термодинамический потенциал, внутреннюю энергию и энтропию с энтальпией. Следует отметить, что в таком случае возникает необходимость численного определения ряда констант на основе физических моделей состояния исследуемых веществ, которые могут удовлетворительно описывать термодинамический процесс для определенной комбинации показателей.

Проведя анализ существующих исследований, можно сделать вывод о том, что внутренняя область (B), которая выделяется на фазовой диаграмме (рис. 1.2) в плоскости p - V , не имеет в данный момент удовлетворительного и достаточного описания, которое бы позволило установить приемлемое для всего диапазона уравнение состояния обследуемой среды гидротехнического сооружения с асимптотическими частными случаями. В результате основным является направление, для которого главная задача – построение полуэмпирических и эмпирических уравнений состояния среды грунтового гидротехнического сооружения на основе результатов, полученных

при проведении серийных экспериментов. Достаточным образом данная тенденция проявляется в сфере исследований влияния на вещество импульсных нагрузок, распространяющихся в исследуемой среде грунтового гидротехнического сооружения ударных волн и интенсивных волн сжатия среды [3].

Под ударной волной (УВ) в данном случае определим тонкую переходную область, которая распространяется со сверхзвуковой скоростью, с резким увеличением плотности, давления и скорости вещества.

В механике сплошной среды зона ударного перехода представляется в виде геометрической поверхности, на которой происходит разрыв функций параметров, характеризующих состояние движения плотной, жидкой или газообразной среды и её движение. В данном случае можно говорить о разрыве нулевого порядка. Когда функции и их производные непрерывны до $(n-1)$ -го порядка и n -е производные разрываются, можно говорить о разрыве n -го порядка, который относится к слабому. Скорость и направление поверхностей среды может быть отличной от скорости движения и направления поверхностей разрыва. Разрывы, находящиеся в состоянии покоя относительно рассматриваемой среды гидротехнического сооружения, являются тангенциальными, или контактными [4, 5].

В случае, когда поверхность разрыва является гладкой и распространяется со скоростью, которая в свою очередь является дифференцируемой и непрерывной функцией координат и значений времени, параметрические свойства среды перед волной и за ней отвечают соотношениям, называемым условиями совместности. В данном случае можно рассматривать динамические, кинематические и геометрические условия совместности. В случае невыполнения условий совместности происходит распад разрыва на неопределенное количество разрывов.

Впервые результаты, полученные при изучении условий совместности для одномерных течений, были опубликованы Гюгионо.

При использовании законов сохранения массы, импульса и энергии для невязких газов в интегральной форме с положением, связанным с ударной волной, условия на ней можно сформулировать в форме Ренкина-Гюгионо:

$$D^2 = V_0^2 \frac{p - p_0}{V_0 - V}, \quad (1)$$

$$v = \frac{p - p_0}{\rho_0 D} = \sqrt{(p - p_0)(V_0 - V)}; \quad (2)$$

$$E - E_0 = 0,5(p + p_0)(V_0 - V), \quad (3)$$

где D – скорость ударной волны; p_0, V_0, ρ_0, E_0 – давление, удельный объем, плотность, удельная внутренняя энергия среды гидротехнического сооружения перед фронтом ударной волны; p, v, E – те же показатели за фронтом ударной волны; v – скорость движения частиц среды гидротехнического сооружения.

С помощью данных соотношений можно определить параметрические значения среды гидротехнического сооружения за фронтом ударной волны при условии, что известны состояние среды гидротехнического сооружения и скорость распространения ударной волны внутри нее.

Начальному состоянию среды гидротехнического сооружения и его состоянию после воздействия ударной сжимающей нагрузки соответствует пуассоновская адиабата (рис. 1.3) через точки (p_0, V_0) и (p_y, V_y) .

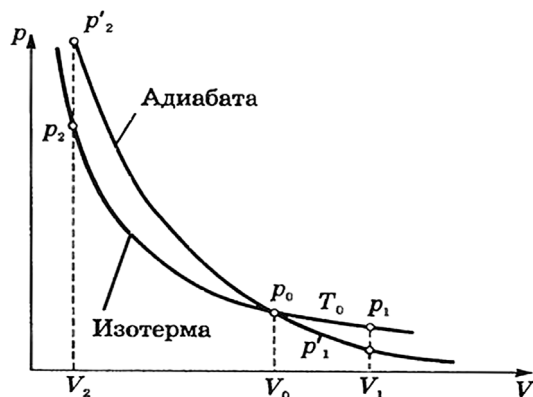


Рис. 3. Адиабаты ударного сжатия
Fig. 3. Adiabath of shock compression

В точке пересечения линии Рэля с адиабатой Гюгонио определяется конечное состояние среды гидротехнического сооружения за фронтом ударной волны, которое соответствует закону сохранения энергии. В случае ударного сжатия вещества при данном изменении V необходимо более значительное изменение p , нежели при адиабатическом сжатии, связанные с переходом в теплоту кинетической энергии потока, набегающей на гидротехническое сооружение ударной волны.

В зависимости от термодинамических свойств рассматриваемых сред в них может иметь место распространение как ударных волн, так и волн разрежения.

В случае, когда в плоскости (p, V) изотропия среды образует положительную кривизну $(V / \partial p^2) S > 0$, может существовать только ударная волна сжатия. Если же среда обладает аномальными термодинамическими характеристиками и $(V / \partial p^2) S < 0$, то имеет место распространение ударных волн разрежения.

Результаты и обсуждение. Ширина фронта ударной волны в газообразной среде имеет порядок длины свободного пробега молекул. Таким образом, можно не учитывать столь малую ширину и с наибольшей точностью заменить фронт ударной волны на поверхность разрыва, имея в виду, что при прохождении через нее параметры газа изменяются скачкообразно. В других случаях распространения ударных волн в совершенных газах ударные адиабаты можно рассчитать с помощью закона сохранения энергии на фронте ударной волны (3) и уравнения состояния газообразной среды:

$$E = pV / (\gamma - 1), \quad (4)$$

изотропу которой можно определить следующим соотношением:

$$p / p_0 = (\rho / \rho_0)^\gamma, \quad (5)$$

где $\gamma = C_p / C_v$ – показатель адиабаты; C_p и C_v – удельные теплоемкости при постоянном объеме и давлении.

Если исключить внутреннюю энергию из уравнений (1.3) и (1.4), ударная адиабата принимает вид:

$$p / p_0 = (\gamma + 1) V_0 - (\gamma - 1) V / (\gamma + 1) V_0 - (\gamma - 1) V_0. \quad (6)$$

Из данного уравнения следует, что не происходит увеличения плотности газа к беспредельному значению $p \rightarrow \infty$. Напротив, она стремится к предельному значению $p / p_0 = V_0 / V = (\gamma + 1) / (\gamma - 1)$. В этом заключается отличие ударного сжатия от изоэнтропического. Главным отличием изоэнтропического сжатия от ударного является то, что в нем происходит возрастание плотности с увеличением давления, и этот процесс является неограниченным [6].

В отличие от газов для твердых и жидких сред рассчитать адиабату подобным образом невозможно в связи с неизвестностью уравнений их состояния. По этой причине определение ударных адиабат твердых и жидких сред производится экспериментальным путем, а уравнение состояния строится по неизвестной адиабате, в связи

с чем можно представить полную энергию вещества в виде сумм:

$$P = p_x + p_r + p_e \quad \text{и} \quad E = E_x + E_r + E_e, \quad (7)$$

где p_x и E_x – упругие компоненты давления, которые обусловлены взаимодействием атомов и молекул при $T = 0K$; p_r и E_r – тепловые составляющие энергии и давления, образованные в результате движения частиц; p_e и E_e – электронные составляющие энергии и давления, возникающие в результате теплового взаимодействия электронов при температурных воздействиях порядка 10^4 К и сформировавшемся давлении порядка 10^2 ГПа.

В результате температурного воздействия $T < 10^4 K$ соотношение, описанное в формуле (7), упрощается до вида:

$$p = p_x + p_r \quad \text{и} \quad E = E_x + E_r. \quad (8)$$

Если составляющие p_x и E_x связаны между частицами только силой взаимодействия и не зависят от температурного взаимодействия, можно сказать, что они представляют собой изотермы при $T = 0$ К: $p_x = p_x(V)$ и $E_x = E_x(V)$. В данном случае из первого начала термодинамики можно выделить зависимости

$$p_x = -dE_x/dV \quad \text{и} \quad E_x = \int_V^{V_{ok}} p_x(V) dV, \quad (9)$$

где V_{ok} – удельный объем рассматриваемого вещества при $T = 0K$.

Соотношение для твердой среды

$$p_r = \Gamma E_r / V, \quad (10)$$

является схожим с уравнением состояния газообразной среды (4), для которого $p = p_r$ и $\Gamma = \gamma - 1$.

Значения энергии и давления в твердых и жидких средах обусловлены взаимодействием упругих и тепловых составляющих, а также температурным движением частиц. С теоретической точки зрения не представляется возможным построить функцию $E(p/\rho)$ в определенном диапазоне термодинамических характеристик для твердых и жидких сред, в связи с чем ударные адиабаты можно определить эмпирическим способом или полностью основываясь на экспериментальных исследованиях.

Для ударных волн с фронтальным давлением от 1 до 10 ГПа и развивающихся при детонации, ударе или взрыве увеличение свойств энтропии на фронте ударной волны невелико, поэтому можно воспользоваться аппроксимациями для

ударных адиабат в виде следующих выражений [6]:

$$D = a + bv; \quad p = A \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right]; \quad (11)$$

$$p = A \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n + B; \quad p = \sum_1^i a_i \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^i, \quad (12)$$

где $a_i = const$ для различных рассматриваемых материалов, используемых в теле грунтовой плотины; a , b , A , n – константы, определяемые для каждого материала экспериментальным путем и зависящие от интенсивности изменения энтропии [7-9].

Чтобы описать экспериментальные результаты, наиболее подходящей является пара переменных $D-v$. Связано это с тем, что для достаточно широкого спектра рассматриваемых сред соблюдается закон

$$D = a + bv, \quad (13)$$

При фазовых переходах и заметной пористости тела грунтового гидротехнического сооружения можно наблюдать отклонения от линейного закона (13).

Давление и энергию в случае произвольного сжатия можно связать с их показателями на адиабате Гюгонио (p_Γ и E_Γ) следующим уравнением состояния:

$$E = E_\Gamma + (p - p_\Gamma) / \rho \Gamma, \quad (14)$$

где $\Gamma = V(dp/dE)$; v – среднее значение показателя Грюнайзена, независимое от давления, то есть $p_\Gamma = p_0 \Gamma_0$ (нулевой индекс находит свое соответствие при нулевых значениях давлений) [10].

Выводы

Эксплуатационная надежность и безопасность напорных гидротехнических сооружений связана со многими факторами, среди которых необходимо выделять ударные воздействия и влияние ударных волн на тело грунтовых плотин.

Суть процессов образования и распространения ударных волн в плотных и жидких средах имеет ряд принципиальных отличительных характеристик при образовании и распространении фронта ударных волн в газообразных средах. Большой интерес представляют воздействия ударного сжатия молекулярной жидкости, так как при достижении высоких значений температур и плотностей, а также при наличии высоких показателей градиентов рассматриваемых показателей образуются значительные

межмолекулярные взаимодействия, в результате которых возможны разрывы химических связей рассматриваемых элементов, фазовые превращения и перераспределение энергии между внутренними степенями свободы молекулярной решетки.

Плотные и жидкие среды имеют ряд особенностей при ударноволновом воздействии. Вода в верхнем бьефе гидротехнического сооружения и ее теле является сложной жидкостью, так как многие ее характеристики существенным образом отличаются по своей величине от аналогичных характеристик других жидкостей либо имеют так называемые аномалии на зависимостях от давления и температуры. Физические свойства воды обуславливаются структурой ее молекулярной решетки. Ядра молекул H_2O образуют равнобедренный треугольник,

в основании которого расположены протоны, а на вершине – атом кислорода, то есть потенциал взаимодействия на межмолекулярном уровне не является сферическим, потому что молекула H_2O имеет несколько полюсов заряда энергии, а именно четыре, в свою очередь обусловленные ее электронной конфигурацией. Вид такой конфигурации представляет собой тетраэдр, две вершины которого расположены на протонах, а остальные две – в центральной части облаков неразделенных пар электронов атома кислорода. В случае такой электронной конфигурации молекулы воды приводят к образованию серьезного дипольного момента. Значительное воздействие на свойства воды может оказывать способность ее молекул принимать участие в четырех водородных связях за счет протонов и неразделенных электронных пар.

Библиографический список

1. Физика взрыва / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум и др. Т. 1. – М.: Физматлит, 2002. – 283 с.
2. Высокоскоростные ударные явления / Пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 533 с.
3. **Ионов В.Н., Селиванов В.В.** Прикладная механика сплошных сред. Механика разрушения деформируемого тела. Т. 2. – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2006. – 419 с.
4. **Хан Г., Шапиро Г.** Статистические модели в инженерных задачах. – М.: Мир, 1969. – 395 с.
5. **Harter H.L.** New Tables of the Incomplete Gamma-Function Ratio and of Percentage Points of the Chi-square and Beta Distributions. Aerospace Research Laboratories U.S. Air Force, 1964. – 245 p.
6. **Кочин Н.Е.** К теории разрывов в жидкости / Собр. соч. Т. 2. – М.–Л.: Советское радио, 1978.
7. **Шугаев Ф.В.** Взаимодействие ударных волн с возмущением. – М.: Изд-во Московского университета, 1983. – 96 с.
8. **Зельдович Я.Б.** Теория ударных волн и введение в газодинамику. – М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2002. – 186 с.
9. **Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.** Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений: практическое пособие. – 3-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2008. – 653 с.
10. **Фомин В.М., Яковлев В.И.** Энергообмен в сверхзвуковых газоплазменных течениях с ударными волнами. – М.: Физматлит, 2017. – 366 с.

References

1. Fizika vzryva. T. 1. / Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., i dr. – M.: Fizmatlit, 2002. – 283 s.
2. Vysokoskorostnye udarnye yavleniya / Per. s angl. – M.: Mir, 1973. – 533 s.
3. **Ionov V.N., Selivanov V.V.** Prikladnaya mehanika sploshnyh sred. Tom 2. Mehanika razrusheniya deformiruemogo tela. – M.: MGTU imeni N.E. Baumana, 2006. – 419 s.
4. **Khan G., Shapiro G.** Statisticheskie modeli v inzhenernyh zadachah. – M.: Mir, 1969. – 395 s.
5. **Harter H.L.** New Tables of the Incomplete Gamma-Function Ratio and of Percentage Points of the Chi-square and Beta Distributions. Aerospace Research Laboratories U.S. Air Force, 1964. – 245p.
6. **Kochin N.E.** K teorii razryvov v zhidkosti / Sobr. soch. T. 2. – M.–L.: Sov. radio, 1978.
7. **Shugaev F.V.** Vzaimodejstvie udarnykh voln s vozmushcheniem. – M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1983. – 96 s.
8. **Zeldovich Ya.B.** Teoriya udarnykh kolebanij i vvedenie v gazodinamiku. – M. – Izhevsk: NITS «Regulyarnaya i haotichnaya dinamika», 2002. – 186 s.
9. **Zeldovich Ya.B., Rajzer Yu.P.** Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavlenij: prakticheskoe posobie, 3-e izd., ispravl. – M.: Fizmatlit, 2008. – 653 s.
10. **Fomin V.M., Yakovlev V.I.** Energoobmen v sverhzvukovyh gazoplazmennyyh techeniyah s udarnymi volnami. – M.: Fizmatlit, 2017. – 366 s.

Критерии авторства

Андреев Е.В. выполнил теоретические исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись.

Андреев Е.В. имеет на статью авторское право и несет ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 12.05.2021 г.

Одобрена после рецензирования 05.06.2021 г.

Принята к публикации 28.06.2021 г.

Conflict of interests

Andreev E.V. carried out theoretical studies, on the basis of which he generalized and wrote the manuscript.

Andreev E.V. has a copyright on the article and is responsible for plagiarism.

The article was submitted to the editorial office 12.05.2021

Approved after reviewing 05.06.2021

Accepted for publication 28.06.2021

Оригинальная статья

УДК 502/504:626/627:624.012:45

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-3-62-69

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ УГОЛКОВЫХ ПОДПОРНЫХ СТЕН С МЕЖБЛОЧНЫМИ ШВАМИ С УЧЕТОМ ВТОРИЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

ЛИСИЧКИН СЕРГЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ¹, д-р техн. наук, главный научный сотрудник
cskte@mail.ru

РУБИН ОЛЕГ ДМИТРИЕВИЧ¹, д-р техн. наук,
директор филиала АО «Институт Гидропроект» – НИИЭС
info@niies.ru

ПАЩЕНКО ФЕДОР АЛЕКСАНДРОВИЧ², генеральный директор
АО «ПИИНИИВТ «Ленаэропроект»
lenair@lenair.ru

ХАРЬКОВ НИКИТА СЕРГЕЕВИЧ², канд. техн. наук,
руководитель научно-технического управления
Kharkov_ns@lenair.ru

¹ АО «Институт Гидропроект» – НИИЭС; 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 2, Россия

² АО ПИИНИИВТ «Ленаэропроект»; 198095, г. Санкт-Петербург, Набережная Обводного канала, 122, Россия

Подпорные стены уголкового типа являются одними из наиболее распространенных конструкций гидроузлов. Большинство из них запроектировано и построено несколько десятилетий назад и находится в эксплуатации в течение длительного времени. В ряде случаев отмечается отклонение от проектных предпосылок и требуется усиление железобетонных конструкций подпорных стен. Основной причиной упомянутых отклонений является неполный учет характерных особенностей конструкций подпорных стен (в том числе горизонтальных межблочных швов и вторичных наклонных трещин), а также характера действующих на них нагрузок. Как следствие, в подпорных стенах практически не устанавливается расчетное горизонтальное поперечное армирование, которое не требуется на основе традиционных методик расчета. Традиционные схемы армирования подпорных стен не предусматривают наличия горизонтальных межблочных швов и горизонтального поперечного армирования. В результате проведенных исследований усовершенствована методика расчета напряженно-деформированного состояния и прочности железобетонных конструкций подпорных стен уголкового типа, имеющих межблочные швы, с учетом вторичных напряжений. Также усовершенствованы схемы армирования подпорных стен.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, подпорные стены уголкового типа, напряженно-деформированное состояние, прочность, методика расчета, схемы армирования