

ГАШЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПОТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ КРИВОЛИНЕЙНОЙ СТЕНКИ ВОДОБОЯ

Авторами статьи разработана модель гашения энергии потока с применением криволинейной стенки водобоя. Приведены зависимости суммарной нагрузки на водобойную стенку.

Ключевые слова: кинетическая энергия, водобой, конечная амплитуда, волновой бугор, гашение волны.

R.T. Emelyanov, E.S. Turysheva,
E.S. Spirin, V.E. Afanasyev

STREAM ENERGY SUPPRESSION WITH THE USE OF THE HEARTH CURVED WALL

The model of stream energy suppression with the use of the hearth curved wall is developed by the authors of the article. The dependences of total load on the hearth wall are given.

Key words: kinetic energy, hearth, final amplitude, wave hillock, wave suppression.

Избыточную кинетическую энергию водного потока требуется погасить на укрепленной части водосбросного сооружения. Для гашения волны водосбросного сооружения применяются водобои [1].

Цель исследований. Повышение эффективности гашения энергии водного потока на коротком участке водобоя водосбросного сооружения.

Методы и результаты исследований. Для решения поставленной задачи в водобое водосбросного сооружения на выходе из водобоя предлагается применить водобойный элемент в виде уступа-стенки, напорная поверхность которого выполнена с образованием последовательно чередующихся по длине водобойного элемента впадин и выступов, при этом впадины выполнены вогнутыми, криволинейного очертания.

Параметры образующейся волны могут быть определены путем рассмотрения уравнения сохранения количества движения:

$$m_1 V = m_2 c \tag{1}$$

где m_1, m_2 – масса жидкости в потоке и формирующейся волне; V, c – скорость потока волны.

Частица m , поднимающаяся от источника, будет смещаться на величину Δl со скоростью V_{cp} , меньшей, чем скорость V в сжатом сечении потока (рис. 1). Таким образом, волновой бугор в целом будет смещен в сторону нижнего бьефа. Для того чтобы волна формировалась в пределах водобойного сооружения, необходимо обеспечить возникновение источника на расстоянии, превышающем величину Δl от водобойной стенки. Это условие можно обеспечить подбором радиуса закругления криволинейной стенки R .

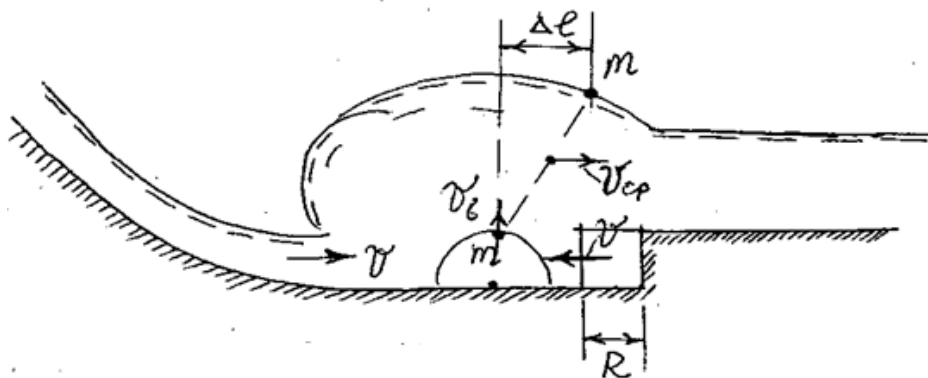


Рис. 1. Формирование стоячей волны конечной амплитуды на водобойном сооружении

Формирование стоячей волны конечной амплитуды на водобойном сооружении возможно путем установки криволинейной стенки (рис. 2).

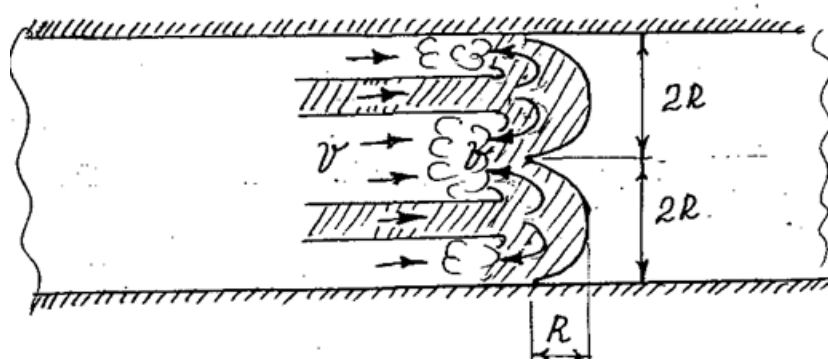


Рис. 2. Расчетная схема водобойного колодца с криволинейной стенкой

Колодец с криволинейной водобойной стенкой позволяет существенно сократить длину колодца, но подвергается более значительным нагрузкам. Наибольшему воздействию подвергаются криволинейные водобойные стенки. Суммарная нагрузка на водобойную стенку может быть представлена следующей формулой [7]:

$$P_{\Sigma} = P_1 + P_2 + P_3, \quad (2)$$

где P_1 – гидростатическое давление, обусловленное возникновением волны, высотой h_B ; P_2 – динамическое давление струи на криволинейную стенку высотой a с учетом центробежных сил; P_3 – пульсации гидродинамического давления, которые определяются как сумма составляющих пульсаций гидродинамического давления от взаимодействия волн и как флуктуации струи, набегающей на криволинейную стенку.

$$P_1 = \gamma h'_B. \quad (3)$$

Согласно [2], для P_2 можно принять выражение:

$$P_2 = \sqrt{P_{2v}^2 + P_{2n}^2}, \quad (4)$$

где P_{2v} – динамическое воздействие, обусловленное изменением количества движения жидкости; P_{2n} – динамическое воздействие, обусловленное центробежными силами при обтекании криволинейной поверхности.

Выведем выражение для P динамического воздействия струи на элемент криволинейной стенки. Расчетная схема представлена на рис. 3.

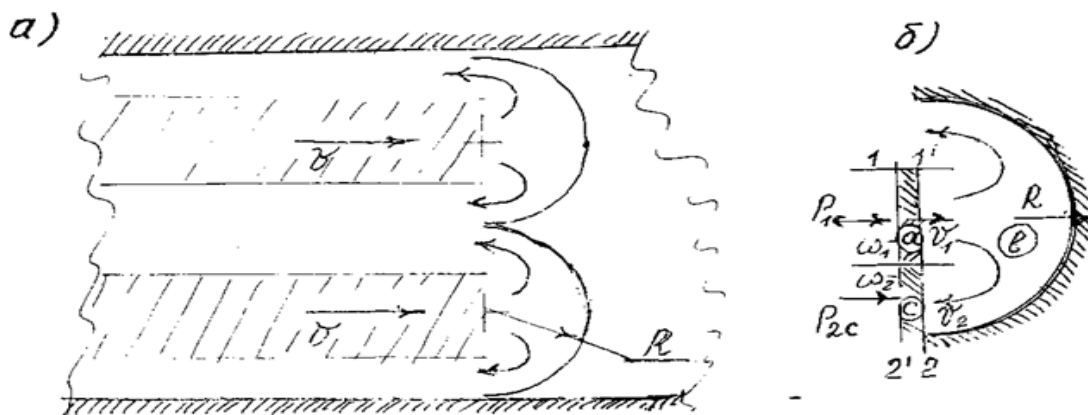


Рис. 3. Расчетная схема водобоя с криволинейной стенкой: а – общая расчетная схема; б – схема набегающего потока на один элемент кривизны

Струя набегаёт на криволинейную стенку со скоростью u_1 , а сбегает со скоростью u_2 . Найдем изменение количества движения расхода жидкости при набегаании на криволинейную стенку согласно [3].

$$d(mv) = kd(c) - kd(a), \quad (5)$$

где $kd(c)$ – количество движения расхода жидкости при набегаании на криволинейную стенку; $kd(a)$ – количество движения расхода жидкости при сбегании с криволинейной стенки.

В общем случае для расчетной схемы, представленной на рис. 2, б, будет иметь место неравномерное распределение скоростей [4, 5], т.е. $u = v_2 + \varepsilon$, где v_2 – средняя скорость по сечению ω_2 , $\varepsilon \leq 0$.

Тогда получим

$$\begin{aligned} kd(c) &= \int_{\omega} (dmu) = \rho dt \int_{\omega} u^2 d\omega = \rho dt (v_2^2 \omega_2 + \int_{\omega_2} \varepsilon^2 d\omega) = \\ &= \rho dt v_2^2 \omega_2 \left(1 + \frac{\int_{\omega_2} \varepsilon^2 d\omega}{v_2^2 \omega_2}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\left(1 + \frac{\int_{\omega_2} \varepsilon^2 d\omega}{v_2^2 \omega_2}\right)$ – коэффициент Буссинеска.

Если принять $d_0 = \text{const}$, то для схемы рис. 2, б приращение количества движения для выделенной массы жидкости между сечениями 1-1 и 2-2 будет определяться следующим выражением:

$$\rho d_0 Q dt (v_2 - v_1) = (P_{1c} + P_{2c} + R) dt. \quad (7)$$

Если принять $P_1 = P_2$ и $u_2 = 0$, то будем иметь

$$R = -\rho d_0 Q v_1 - P_1 - P_2 = -(\rho d_0 Q v_1 + 2P_1). \quad (8)$$

Если дуга криволинейной части стенки меньше π_1 , то выражение (8) будет представляться в виде

$$R = -\rho d Q (v_2 \cos \alpha_1 + v_2 \cos \alpha_2) - P_1 - P_2, \quad (8a)$$

где α_1, α_2 – углы входа и выхода на криволинейной части.

Для отыскания центробежной силы, действующей на криволинейную стенку, воспользуемся зависимостью [2], согласно которой

$$P_{2n} = \rho Q l_c \times \frac{v^2}{R_{cm}}, \quad (9)$$

где $\frac{v^2}{R_{cm}} = a_n$ – ускорение потока, обусловленное центробежными силами (нормальное к кривизне стенки); R_{cm} – радиус закругления стенки; v – скорость потока обтекания криволинейной части стенки (касательная скорость).

Подставляя (7) и (9) в (3), получаем формулу для P_2 :

$$P_2 = \sqrt{[-(\rho d_0 Q v_1 + 2P_1)]^2 + [\rho Q l_c \times \frac{v^2}{R_{cm}}]^2} ; \quad (10)$$

$$P_3 = P_{31} + P_{32} , \quad (11)$$

где P_{31} – пульсации гидродинамического давления, обусловленные взаимодействием волн;

P_{32} – пульсации гидродинамического давления, обусловленные флуктуациями набегающей на криволинейную стенку струи.

Формулы для определения P_{31}, P_{32} . Нагрузки P_{31} определяются по частотным характеристикам волн и могут быть оценены по приближенным зависимостям:

- для косинусоидальных волн [6]:

$$\xi_1 = h'_{b1} \times \cos(\omega_1 t - k_1 x); \quad \xi_2 = h'_{b2} \times \cos(\omega_2 t - k_2 x) , \quad (12)$$

где ξ_1, ξ_2 – амплитуды двух волн; h'_{b1}, h'_{b2} – наибольшие амплитуды волн;

ω_1, ω_2 – круговые частоты волн $\omega_1 = \frac{2\pi c_1}{\lambda_1}; \omega_2 = \frac{2\pi c_2}{\lambda_2}$; c_1, c_2 – скорость распространения

волны;

λ – длина волны.

При взаимодействии волн (12), если $(\omega_1 t - k_1 x) = (\omega_2 t - k_2 x) = \gamma$, имеем величину:

$$\xi = (h'_{b1} + h'_{b2}) \cos \gamma \quad (13)$$

При $(\omega_1 t - k_1 x) \neq (\omega_2 t - k_2 x)$ имеем

$$\xi = A(\sin \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \cos \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} + \cos \frac{\delta_2 + \delta_4}{2} \cos \frac{\delta_3 + \delta_4}{2}), \quad (14)$$

где $\delta_1 = [\alpha - (\omega_1 t - k_1 x)]; \delta_2 = [\alpha + (\omega_1 t - k_1 x)]; \delta_3 = [\alpha(\omega_2 t - k_2 x)];$

$\delta_4 = [\alpha + (\omega_2 t - k_2 x)];$

$$\sin \alpha = \frac{h'_{b1}}{\sqrt{h'^2_{b1} + h'^2_{b2}}}; \quad \cos \alpha = \frac{h'_{b2}}{\sqrt{h'^2_{b1} + h'^2_{b2}}}; \quad A = \sqrt{h'^2_{b1} + h'^2_{b2}}$$

Оценка нагрузки P_{32} целесообразна на основе экспериментальных данных.

Выводы

Преимущество представленного водобоя водосбросного сооружения заключается в более эффективном гашении энергии потока на сравнительно коротком участке за счет формирования отраженных волн, также обеспечивается эффективное гашение гидравлического прыжка в связи с образованием волновых флуктуаций.

Литература

1. Гидротехнические сооружения /под ред. Н.П. Розанова. – М.: Стройиздат, 1978. – 646 с.
2. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений/ под ред. Б.Т. Емцева. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 620 с.
3. Лайтхилл Дж. Волны в жидкостях. – М.: Мир, 1981. – С. 180–330.
4. Богомолов А.И., Михайлов К.А. Гидравлика. – М.: Стройиздат, 1972. – С. 320–342.
5. Рауз Х. Механика жидкости для инженеров-гидротехников. – М.; Л.: Тосэнергоиздат, 1958. – С. 337–361.
6. Стокер Дж. Волны на воде. – М., 1959.
7. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. – М.: Физматгиз, 1963. – С. 447–448.



УДК 539.3

А.Д. Матвеев

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ ДВУХСЕТОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РАСЧЕТАХ ТРЕХМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ БАЛОК*

Предложены процедуры построения граничных двухсеточных конечных элементов для расчета трехмерных композитных балок, имеющих сложный характер закрепления. Применение предлагаемых граничных элементов в дискретных двухсеточных моделях трехмерных балок приводит к уменьшению погрешности сеточных решений. При этом двухсеточные дискретные модели, включающие граничные элементы, имеют малую размерность.

Ключевые слова: композиты, балки, упругость, двухсеточные конечные элементы, метод конечных элементов, граничные элементы.

A.D. Matveev

APPLICATION OF BOUNDARY DOUBLE-GRID ELEMENTS IN THE CALCULATION OF THREE-DIMENSIONAL COMPOSITE BEAMS

Constructing boundary double-grid finite elements to calculate three-dimensional composite beams having the difficulty of fastening is shown. Application of the proposed boundary elements in discrete double-grid models of three-dimensional beams leads to the error reduction of mesh solutions. Moreover, discrete models including boundary elements have small dimensions.

Key words: composites, beams, elasticity, double-grid finite elements, finite elements method, boundary elements.

Введение. Как показывают расчеты, решения, построенные для упругих трехмерных композитных балок по методу конечных элементов (МКЭ) [1, 2, 3] с применением двухсеточных конечных элементов (ДвКЭ) первого типа [4, 5], наибольшую погрешность имеют в окрестностях границ закрепления балок. Особенно большая погрешность решения возникает в случае сложного характера закрепления балки. Например, частичное закрепление балки по торцу. В связи с этим предлагается в окрестностях границ крепления балок использовать граничные ДвКЭ.

Краткая суть ДвКЭ V_p первого типа [4, 5] формы прямоугольного параллелепипеда состоит в следующем. Для построения ДвКЭ используем две вложенные сетки: мелкую и крупную. Базовое разбиение ДвКЭ V_p состоит из конечных элементов (КЭ) V^h первого порядка формы куба [2], которое учитывает его неоднородную структуру по микроподходу [6] и порождает мелкую сетку. Отметим, что при построении КЭ V^h

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 14-01-00130).