

В. И. Скалозубов¹, И. Л. Козлов², Т. В. Габлая¹, Г. С. Драган³, В. Ю. Кочнева¹

¹ Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, Киев, 03028, Украина

² Одесский национальный политехнический университет, просп. Шевченко 1, Одесса, 65044, Украина

³ Ильичевский институт Одесского национального университета имени И. И. Мечникова,
ул. Данченко, 17а, Ильичевск, 68000, Украина

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАТОПЛЕНИЯ ЦУНАМИ ПРОМПЛОЩАДКИ АЭС FUKUSHIMA-DAIICHI

Предложена гидродинамическая модель возникновения и распространения цунами на основе консервативных допущений. В результате численного моделирования установлена возможность достижения высоты волны 15 м у побережья АЭС Fukushima-Daiichi при значении приведенного коэффициента гидродинамического сопротивления 1,8. Согласно разработанной модели возможность затопления определяется не только высотой промплощадки, мощностью и расстоянием землетрясения, но и продолжительностью сейсмических толчков, условиями диссипации энергии, размерами эпицентра и другими факторами.

Ключевые слова: затопление, цунами, землетрясение, гидродинамическая модель.

Основные положения и допущения расчетной модели затопления промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi

1. Землетрясение с максимальным ускорением $a_{эц}$ на глубине $h_{эц}$ и на площади поверхности дна $S_{эц}$ (рис. 1) является основным источником волны возмущения водного объема (в данном случае – океана) высотой $h(t)$, которая в общем случае может распространяться во всех направлениях $R(t)$ от эпицентра в горизонтальной плоскости (t – текущее время распространения волны возмущения).

2. Распространение волны возмущения (цунами) происходит под действием сил сейсмического воздействия $F_{се}$, гидродинамического сопротивления $F_{ге}$ и давления ветра плотностью $\rho_{ве}$ и скоростью $w_{ве}$ ($F_{ве}$) при переменной (в общем случае) средней глубине океана $h_c(t)$, которая определяется конкретным рельефом его дна $f_p(R)$.

3. Распространение волны возмущения полагается изотермическим процессом, а сжимаемостью морской воды можно пренебречь (плотность воды ρ постоянна).

4. Консервативно полагается:

направление ветра плотностью $\rho_{ве}$ является попутным для цунами;

при достижении цунами волнореза происходит практически мгновенное торможение водного потока в горизонтальном направлении и резкое возрастание высоты волны торможения $h(R = L_0)$;

высота волны торможения полностью определяет условие затопления промплощадки (без учета гидродинамических и диссипативных процессов в пространстве между волнорезом и промплощадкой).

Процесс развития волны возмущения, вызванной землетрясением, условно разбивается на два временных этапа:

1-й этап возбуждения волны эпицентром землетрясения ($0 \leq t \leq \Delta t_c$);

2-й этап распространения волны возмущения в горизонтальной плоскости ($\Delta t_c \leq t \leq t_0(R = L_0)$).

Такое моделирование допустимо при условии, что время возбуждения цунами Δt_c значительно меньше времени ее распространения до побережья t_0 .

Консервативное условие затопления промплощадки АЭС:

$$\Delta h/h_{np} \geq 1. \quad (1)$$

Тогда, в рамках принятых допущений, модель возбуждения волны высотой $h = h_{эц} + \Delta h$ в районе эпицентра землетрясения (1-й этап):

$$\rho S_{эц} \frac{dh}{dt} = -G_u, \quad (2)$$

$$\rho S_{эц} \frac{d}{dt} \left(h \frac{dh}{dt} \right) = \rho S_{эц} a_{эц} h(t) - \rho v \Pi_{эц} \frac{dh}{dt}; \quad (3)$$

© В. И. Скалозубов, И. Л. Козлов, Т. В. Габлая,
Г. С. Драган, В. Ю. Кочнева, 2013

при краевых условиях

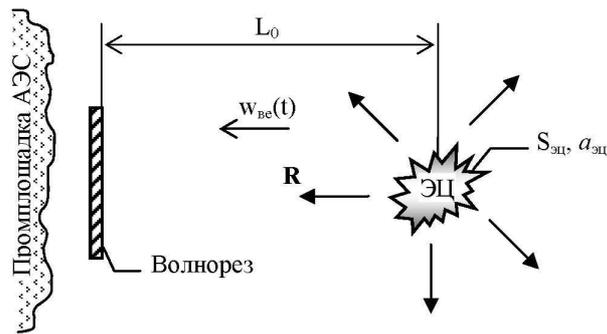
$$h(t = 0) = h_{эц}, \quad (4)$$

$$\frac{dh}{dt}(t = 0) = 0, \quad (5)$$

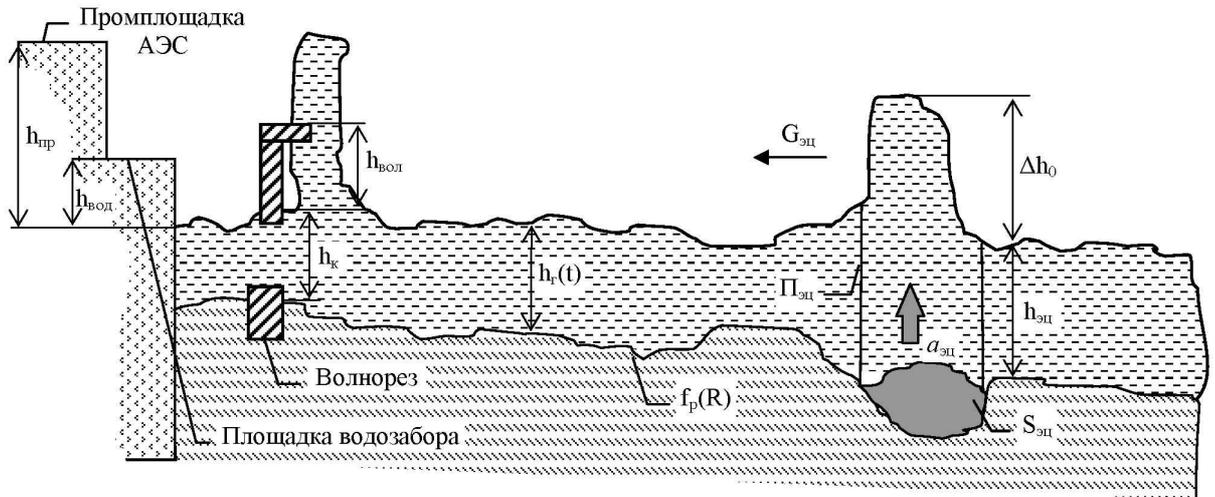
$$h(t = \Delta t_c) = h_{эц} + \Delta h_0, \quad (6)$$

$$\frac{dh}{dt}(t = \Delta t_c) \rightarrow 0, \quad (7)$$

где $G_{эц}$ – расход от эпицентра волны возмущения (цунами); ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости; Δt_c – общая продолжительность подземных толчков; $\Pi_{эц}$ – периметр водяного «столба» возмущения.



а) горизонтальная плоскость



б) вертикальная плоскость

Рис. 1. Расчетная модель затопления цунами промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi.

После преобразований уравнения возбуждения цунами на 1-м этапе (2) и (3) при краевых условиях (4) – (7) имеют следующий вид:

$$h \frac{d^2 h}{dt^2} = a_{\text{эц}} h - \frac{\Pi_{\text{эц}}}{S_{\text{эц}}} v \frac{dh}{dt} - \frac{G_{\text{ц}}^2}{\rho^2 S_{\text{эц}}^2}, \quad (8)$$

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{G_{\text{ц}}}{\rho S_{\text{эц}}}. \quad (9)$$

Конечным результатом интегрирования уравнений (4) – (9) является расход волны цунами в горизонтальной плоскости $G_{\text{ц}}(t = \Delta t_c)$ и начальная высота волны распространения $\Delta h_0(t = \Delta t_c)$.

Модель распространения волны возмущения высотой $\Delta h(t) = h - h_2$ на 2-м этапе процесса имеет вид ($t > t_c$):

$$\rho \frac{d}{dt} [(\Delta h + h_2) R^2] = 0, \quad (10)$$

$$\rho \frac{d}{dt} \left[(\Delta h + h_2) R^2 \frac{dR}{dt} \right] = F_{\text{вe}}(t) - F_{\text{zc}}(t), \quad (11)$$

при краевых условиях

$$h(t = \Delta t_c) = \Delta h_0, \quad R(t = \Delta t_c) = R_{\text{эц}}, \quad (12)$$

$$\frac{dh}{dt}(t = \Delta t_c) = 0, \quad (13)$$

$$\frac{dR}{dt}(t = \Delta t_c) = \frac{G_{\text{ц}}(t = \Delta t_c)}{\rho S_{\text{эц}}}, \quad (14)$$

$$\frac{dR}{dt}(R = L_0) \rightarrow 0, \quad (15)$$

$$h_{\text{r}}(t) = f_{\text{p}}(R), \quad h_{\text{r}}(R = 0) = h_{\text{эц}}, \quad h_{\text{r}}(R = L_0) = h_{\text{к}}, \quad (16)$$

где приведенные текущие силы воздействия на волну попутного ветра $F_{\text{вe}}$ и гидродинамического сопротивления F_{zc}

$$F_{\text{вe}} = \rho_{\text{вe}} w_{\text{вe}}^2 \Delta h R, \quad (17)$$

$$F_{\text{zc}} = \lambda_{\text{zc}} \rho h R \left(\frac{dR}{dt} \right)^2, \quad (18)$$

где λ_{zc} – приведенный коэффициент гидродинамического сопротивления (диссипативных потерь).

Для приведения расчетной модели к критериальной форме введем безразмерные параметры и их масштабы:

$$T_1 = \frac{t_1}{\Delta t_c}, \quad H = \frac{h}{h_{\text{эц}}}, \quad \Delta H = \frac{\Delta h}{h_{\text{пр}}}, \quad H_2 = \frac{h_{\text{r}}}{h_{\text{эц}}},$$

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_{\text{вe}}}{\rho}, \quad L = \frac{R}{L_0}, \quad T = \frac{t}{M_t}, \quad \bar{w} = \frac{w_{\text{вe}}}{M_w}, \quad \bar{G} = \frac{G_{\text{ц}}}{M_G}.$$

Тогда расчетная модель в критериальной форме имеет следующий вид: на 1-м этапе

$$\frac{dH}{dT_1} = -K_G \bar{G}, \quad K_G = \frac{M_G \Delta t_c}{\rho S_{\text{эц}} h_{\text{эц}}},$$

$$H \frac{d^2 H}{dT_1^2} = K_a H - K_v \frac{dH}{dT_1} - K_G^2 \bar{G}^2,$$

$$H(T_1 = 0) = 1, \quad \frac{dH}{dT_1}(T_1 = 0) = 0,$$

$$H(T_1 = 1) = 1 + K_h \Delta H_0, \quad \frac{dH}{dT_1}(T_1 = 1) \rightarrow 0;$$

на 2-м этапе

$$K_h \frac{d\Delta H}{dT} = -2(K_h \Delta H + H_r) \frac{dL}{dT} - \frac{dH_r}{dT},$$

$$(K_h \Delta H + H_r) L^2 \frac{d^2 L}{dT^2} = K_w \bar{\rho} \bar{w}^2 \Delta H K_h - \lambda_{rc} (K_h \Delta H + H_r) L \left(\frac{dL}{dT} \right)^2,$$

$$\Delta H(T=0) = \Delta H_0, \quad L(T=0) = L_{эц}, \quad H(T=0) = 1 + K_h \Delta H_0,$$

$$\frac{dH}{dT}(T=0) = 0, \quad \frac{dL}{dT}(T=0) = K_L, \quad \frac{dL}{dT}(L=1) \rightarrow 0,$$

где

$$K_G = \frac{M_G \Delta t_c}{\rho S_{эц} h_{эц}}, \quad K_a = \frac{\Delta t_c^2}{h_{эц}} (a_{эц} - g), \quad K_v = \frac{v \Delta t_c \Pi_{эц}}{h_{эц} S_{эц}},$$

$$K_h = \frac{h_{пп}}{h_{эц}}, \quad K_w = M_w^2 \frac{h_{пп} M_t^2}{h_{эц} L_0^2}, \quad K_L = \frac{G_{ц}(t = \Delta t_c) M_t}{\rho S_{эц} L_0}.$$

Исходя из условия $K_G \equiv K_w \equiv K_L \equiv 1$, получаем масштабы:

$$M_t = \frac{\rho S_{эц} L_0}{G_{ц}(t = \Delta t_c) R'(0)},$$

$$M_G = \frac{\rho S_{эц} h_{эц}}{\Delta t_c},$$

$$M_w = \frac{h_{эц} G_{ц}^2(t = \Delta t_c)}{h_{пп} \rho^2 S_{эц}^2} = \frac{h_{эц}}{h_{пп}} R'(0).$$

Таким образом, окончательная критериальная форма расчетной модели имеет вид:
на 1-м этапе

$$\frac{dH}{dT_1} = -\bar{G}, \tag{19}$$

$$H \frac{d^2 H}{dT_1^2} = K_a H - K_v \frac{dH}{dT_1} - \bar{G}^2, \tag{20}$$

$$H(T_1 = 0) = 1, \quad \frac{dH}{dT_1}(T_1 = 0) = 0, \tag{21}$$

$$H(T_1 = 1) = 1 + K_h \Delta H_0, \quad \frac{dH}{dT_1}(T_1 = 1) \rightarrow 0; \tag{22}$$

на 2-м этапе

$$K_h \frac{d\Delta H}{dT} = -2(K_h \Delta H + H_r) \frac{dL}{dT} - \frac{dH_r}{dT}, \tag{23}$$

$$(K_h \Delta H + H_r) L^2 \frac{d^2 L}{dT^2} = \bar{\rho} \bar{w}^2 \Delta H K_h - \lambda_{zc} (K_h \Delta H + H_r) L \left(\frac{dL}{dT} \right)^2, \tag{24}$$

$$\Delta H(T=0) = \Delta H_0, \quad L(T=0) = L_{\text{эц}}, \quad H_c(T=0) = 1 + K_h \Delta H_0, \quad (25)$$

$$\frac{d\Delta H}{dT}(T=0) = \frac{dH_c}{dT}(T=0) = 0, \quad \frac{dL}{dT}(T=0) = 1, \quad \frac{dL}{dT}(L=1) \rightarrow 0, \quad (26)$$

$$H_r(t) = f_p(R), \quad H_r(L=1) = h_k/h_{\text{эц}}. \quad (27)$$

Условие затопления промплощадки

$$\Delta H > 1. \quad (28)$$

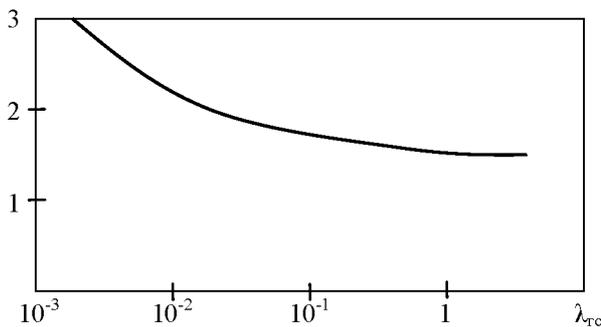
Анализ результатов расчетного моделирования

1. Расчетная математическая модель представляет систему нелинейных дифференциальных уравнений, не имеющую тривиальных аналитических решений. Поэтому интегрирование было проведено известным численным методом Рунге-Кутты с относительной расчетной погрешностью менее 1 %.

2. Основными определенными исходными данными расчетного моделирования были [1]: максимальный отклик ускорения землетрясения в эпицентре 2,0g на глубине 24 км; консервативно продолжительность толчков землетрясения в эпицентре 200 с, а расстояние от эпицентра до промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi 160 км*; высота промплощадки АЭС над средним уровнем моря 10 м.

Неопределенными исходными данными являлись: площадь поверхности эпицентра землетрясения; рельеф поверхности дна от эпицентра до промплощадки; скорость попутного ветра; коэффициент гидродинамического сопротивления. В расчетах для рельефа поверхности дна принималась линейная аппроксимация, а относительные размеры эпицентра землетрясения 0,05. Для определения значения приведенного коэффициента гидродинамического сопротивления $\lambda_{\text{гс}}$ были проведены вариационные расчеты, на основе которых из условия $\Delta H = 1,5$ было получено значение 1,8 (рис. 2). Влиянием скорости попутного ветра пренебрегалось.

$\Delta H(R = L_0)$



* По отдельным источникам информации продолжительность толчков не превышала 100 с, а расстояние до эпицентра – 180 км.

Рис. 2. Зависимость относительной высоты цунами у побережья от приведенного коэффициента гидродинамического сопротивления.

3. Основные результаты расчетного моделирования средней по проходному сечению скорости распространения и относительной высоты цунами приведены на рис. 3. На начальном этапе возбуждения землетрясением значения скорости и высоты цунами резко возрастают. Далее под действием диссипативных процессов гидродинамического сопротивления скорость распространения волны монотонно уменьшается, а с приближением к волнорезу происходит резкое торможение. Изменение скорости волны и уменьшение глубины на пути распространения определяют и характер изменения относительной высоты цунами, которая достигает 15 м перед волнорезом.

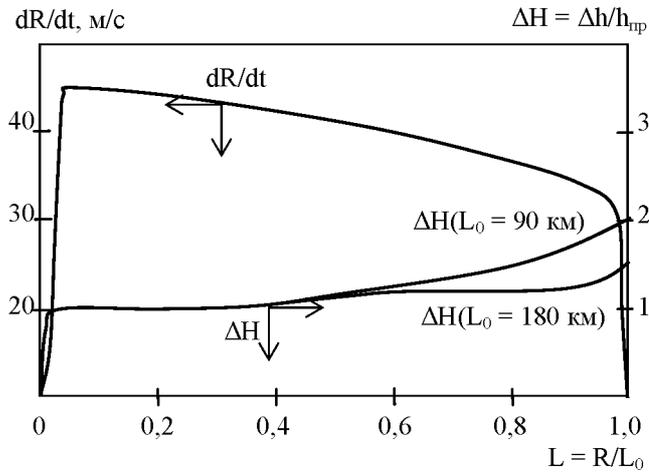


Рис. 3. Основные результаты расчетного моделирования средней скорости и относительной высоты цунами, вызванного землетрясением с 2,0g.

4. На основе анализа критериальной формы гидродинамической модели цунами и вариационных расчетов установлена существенная зависимость высоты волны цунами у побережья от следующих критериев:

$$C_1 = \frac{a_{эц} \Delta t_c h_{эц}}{v \lambda_{эц}}; \quad C_2 = \frac{L_{эц}}{L_0}; \quad C_3 = \frac{h_k}{h_{эц}}. \quad (29)$$

В частности, при расстоянии от эпицентра до побережья в два раза меньше, чем до промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi (ориентировочно расположение от эпицентра АЭС Onagawa), высота волны может достигнуть 20 м (см. рис. 3). Эти результаты расчетного моделирования, а также вариационные расчеты по определению $\lambda_{эц}$ (см. рис. 2) подтверждают значительное влияние диссипативных гидродинамических потерь на основные параметры цунами.

Проектные и послепроектные (ТЕРСО – JSCE) оценки максимальной возможной высоты цунами у побережья АЭС Fukushima-Daiichi не учитывали в полной мере влияние критериев (29), что в конечном итоге и определило заниженность этих оценок. С другой стороны, предлагаемая гидродинамическая модель затопления промплощадки АЭС цунами не требует привлечения недостаточно обоснованных 300 – 500 % запасов по оценке высоты цунами, предлагаемых экспертами МАГАТЭ.

5. Основные ограничения предложенной гидродинамической модели затопления промплощадки связаны с принятыми допущениями по оценке отдельных исходных данных (размеры эпицентра землетрясения, рельеф дна, диссипативные потери и другие параметры), а также с усреднением скорости распространения волны по площади проходного сечения. Решение этих вопросов является перспективой усовершенствования предложенной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скалозубов В. И., Ключников А. А., Ващенко В. Н., Яровой С. С. Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2012. – 280 с.

В. І. Скалозубов¹, І. Л. Козлов², Т. В. Габляя¹, Г. С. Драган³, В. Ю. Кочнева¹

¹ Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, корп. 106, Київ, 03028, Україна

² Одеський національний політехнічний університет, просп. Шевченко 1, Одеса, 65044, Україна

³ Іллічівський інститут Одеського національного університету імені І. І. Мечникова, вул. Данченка, 17а, Іллічівськ, 68000, Україна

МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ ЗАТОПЛЕННЯ ЦУНАМІ ПРОММАЙДАНЧИКА АЕС FUKUSHIMA-DAIICHI

Запропоновано гідродинамічну модель виникнення та розповсюдження цунамі на основі консервативних допущень. У результаті чисельного моделювання встановлено можливість досягнення висоти хвилі 15 м у побережжя АЕС Fukushima-Daiichi при значенні приведенного коефіцієнта гідродинамічного опору 1,8. Згідно з розробленою моделлю можливість затоплення визначається не тільки висотою проммайданчика, потужністю й відстанню землетрусу, але й тривалістю сейсмічних поштовхів, умовами дисипації енергії, розмірами епіцентру та іншими чинниками.

Ключові слова: затоплення, цунамі, землетрус, гідродинамічна модель.

V. I. Skalozubov¹, I. L. Kozlov², T. V. Gablaia¹, G. S. Dragan³, V. Yu. Kochnyeva

¹ Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Lysogirska str., 12, building 106,

Kyiv, 03028, Ukraine

² *Odesa national polytechnic university, Shevchenko boulevard, 1, Odesa, 65044, Ukraine*

³ *Odesa national university, Danchenko str., 17a, Illichivsk, 68000, Ukraine*

TSUNAMI INUNDATION MODELING METHOD NPP INDUSTRIAL SITE IN FUKUSHIMA-DAIICHI

Based on conservative assumptions this paper proposes the hydrodynamic model of occurrence and distribution of a tsunami. Using numerical simulation authors have established possibility to reach a wave height of 15 m off the Fukushima-Daiichi coast when the reduced factor of hydrodynamic resistance is 1,8. According to the developed model, flooding possibility is defined by a site level, earthquake intensity and distance, and duration of seismic impacts, conditions of energy dissipation, the sizes of epicentre and other factors.

Keywords: flooding, tsunami, earthquake, hydrodynamic model.

REFERENCES

1. *Skalozubov V. I., Kljuchnikov A. A., Vashchenko V. N., Jarovoy S. S.* Analysis of the Reasons and Consequences of the Accident at Fukushima NPP as the Factor of Prevention of Severe Accidents in Tank Reactors. – Chernobyl: Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, 2012. – 280 p. (Rus)

Надійшла 31.07.2013
Received 31.07.2013