

В. И. Скалозубов¹, В. Н. Ващенко²,
И. Л. Козлов³, Т. В. Габляя¹, Т. В. Герасименко²

¹ Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины,
г. Киев, Украина

² Государственная экологическая академия Украины,
г. Киев, Украина

³ Одесский национальный политехнический университет,
г. Одесса, Украина

Гидродинамическая модель затопления промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi

При проектировании и строительстве АЭС Fukushima-Daiichi (проектная высота площадки АЭС — 10 м) максимальная высота цунами на основе анализа статистических данных (с учетом землетрясения в Чили в 1960 г.) оценивалась приблизительно в 3 м. Детерминистические оценки ТЕРСО — JSCE подтвердили невозможность затопления промплощадки цунами. Однако в результате запроектного землетрясения 11.03.2011 высота цунами у побережья АЭС достигла 15 м, что привело к затоплению и возникновению тяжелых аварий.

В данной работе 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 от эпицентра землетрясения, но и продолжительностью сейсмических толчков, условиями диссипации энергии, размерами эпицентра и другими факторами.

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

В. И. Скалозубов, В. М. Ващенко, И. Л. Козлов, Т. В. Габляя,
т. в. Герасименко

Гідродинамічна модель затоплення проммайданчика АЕС Fukushima-daiichi

У процесі проектування й будівництва АЕС Fukushima-Daiichi (проектна висота майданчика АЕС — 10 м) максимальна висота цунамі на основі аналізу статистичних даних (з урахуванням землетрусу в Чилі у 1960 р.) оцінювалася приблизно в 3 м. Детерміністичні оцінки ТЕРСО — JSCE підтвердили неможливість затоплення проммайданчика цунамі. Проте внаслідок позапроектного землетрусу 11.03.2011 висота цунамі у побережжя АЕС досягла 15 м, що призвело до затоплення й виникнення важких аварій.

У даній роботі запропоновано гідродинамічну модель виникнення й 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 і відстанню від епіцентру землетрусу, але й тривалістю сейсмічних поштовхів, умовами дисипації енергії, розмірами епіцентру та іншими чинниками.

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

© В. И. Скалозубов, В. Н. Ващенко, И. Л. Козлов, Т. В. Габляя,
Т. В. Герасименко 2014

Промплощадка первой очереди энергоблоков АЭС Fukushima-Daiichi была спроектирована на высоте около 10 м над уровнем моря. Для защиты от возможного затопления цунами были сооружены две линии волнорезов высотой около 5 м над уровнем моря (рис. 1). Оценки максимальной высоты цунами, проведенные на этапе проектирования АЭС Fukushima-Daiichi статистическими методами (около 3 м) и впоследствии детерминистическими методами (около 5 м), «гарантировали» эксплуатирующей организации ТЕРСО достаточную защищенность промплощадки от затопления цунами. Однако вследствие запроектного землетрясения магнитудой около 9,0 в эпицентре на расстоянии 160...180 км от побережья 11.03.2011 возникло цунами с высотой волны около 15 м у промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi, что привело к затоплению промплощадки первой очереди с катастрофическими последствиями: полной потере длительного электроснабжения и критической функции безопасности по охлаждению ядерного топлива, что послужило основной причиной возникших тяжелых аварий, разрушительных парогазовых взрывов и катастрофических радиационных выбросов в окружающую среду. По признанию эксплуатирующей организации ТЕРСО, возникшее 11.03.2011 затопление цунами промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi было полной неожиданностью, что во многом определило недостаточную подготовленность персонала по управлению аварийными процессами в сложившихся условиях [1].

Анализируя проектные и эксплуатационные обоснования максимальной у побережья АЭС Fukushima-Daiichi высоты цунами, эксперты МАГАТЭ пришли к выводу, что необходимо было использовать 3—5-кратные запасы оценок [1]. Однако, по нашему мнению, такие «пост-событийные» рекомендации недостаточно обоснованы. Более актуальным представляется усовершенствование детерминистических методов моделирования возможного затопления промплощадок атомных станций, вызванных землетрясением и (или) другими экстремальными природными явлениями. Уникальные данные Фукусимской катастрофы обеспечивают определенный уровень валидации расчетных моделей и перспективу применения для анализа безопасности других АЭС при экстремальных природных явлениях.

Гидродинамическая модель затопления промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi основана на детерминистическом методе [2], основные положения которого заключаются в следующем (рис. 1):

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 $F_{св}$, гидродинамического сопротивления $F_{гс}$ и давления ветра плотностью $\rho_{ве}$ и скоростью $w_{ве}$ ($F_{ве}$) при переменной (в общем случае) средней глубине океана $h_1(t)$, 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

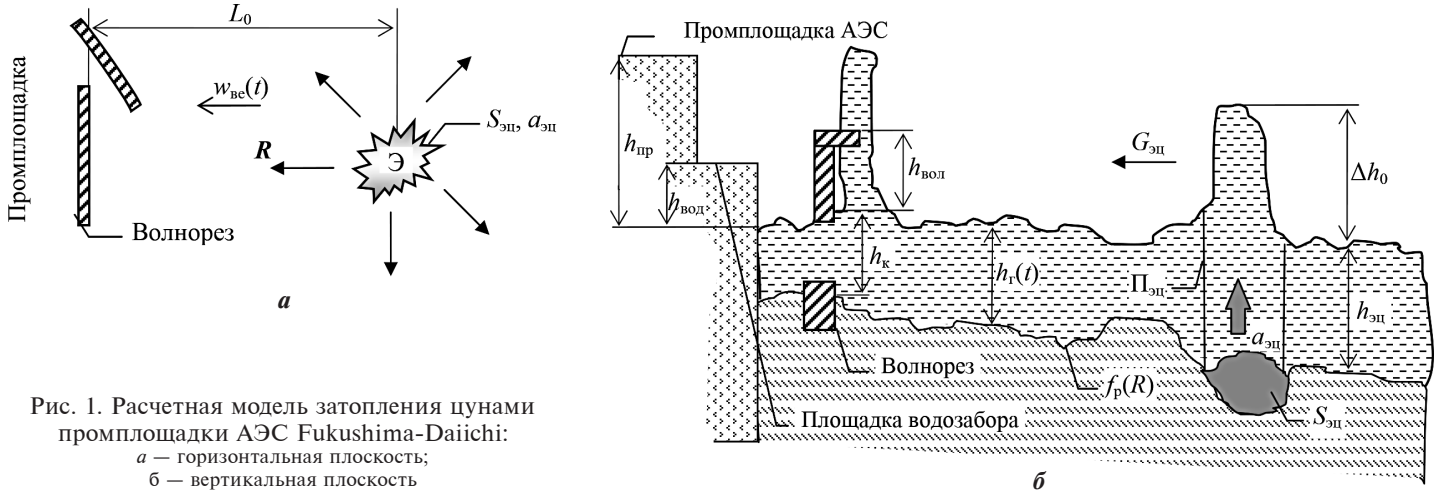


Рис. 1. Расчетная модель затопления цунами промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi:
 а — горизонтальная плоскость;
 б — вертикальная плоскость

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).

Развитие волны возмущения, вызванной землетрясением, условно разбивается на два временных этапа: 1) этап возбуждения волны эпицентром землетрясения ($0 \leq t \leq \Delta t_c$) и 2) этап распространения волны возмущения в горизонтальной плоскости ($\Delta t_c \leq t \leq t_0(R = L_0)$).

Принятое допущение обоснованно при условии, что время возбуждения цунами Δt_c значительно меньше времени распространения цунами до побережья t_0 .

Консервативное условие затопления промплощадки АЭС

$$\Delta h/h_{пр} \geq 1, \quad (1)$$

где Δh — высота волны; $h_{пр}$ — высота промплощадки АЭС.

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

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

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

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); v — коэффициент кинематической вязкости жидкости; Δt_c — общая продолжительность подземных толчков; $\Pi_{эц}$ — периметр водяного «столба» возмущения.

После преобразования уравнений возбуждения цунами на 1-м этапе (1) — (7) получим

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

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

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

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

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

$$\rho \frac{d}{dt} [(\Delta h + h_t) R^2 \frac{dR}{dt}] = F_{св}(t) - F_{гс}(t) \quad (11)$$

при краевых условиях

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

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

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

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

$$h_t(t) = f_p(R), \quad h_t(R = 0) = h_{эц}, \quad h_t(R = L_0) = h_к, \quad (16)$$

где приведенные текущие силы воздействия на волну попутного ветра $F_{св}$ и гидродинамического сопротивления $F_{гс}$

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

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

где $\lambda_{гс}$ — приведенный коэффициент гидродинамического сопротивления (диссипативных потерь).

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

$$T_1 = \frac{t_1}{\Delta t_c}, \quad H = \frac{h}{h_{эц}}, \quad \Delta H = \frac{\Delta h}{h_{пр}}, \quad H_t = \frac{h_t}{h_{эц}},$$

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

Тогда расчетная модель в критериальной форме 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

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

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

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

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

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

$$K_h = \frac{h_{\text{пр}}}{h_{\text{эц}}}; \quad K_w = M_w^2 \frac{h_{\text{пр}} M_t^2}{h_{\text{эц}} L_0^2}; \quad K_L = \frac{G_{\text{и}}(t = \Delta t_c) M_t}{\rho S_{\text{эц}} L_0}.$$

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

$$M_t = \frac{\rho S_{\text{эц}} L_0}{G_{\text{и}}(t = \Delta t_c)} = \frac{L_0}{R'(0)}, \quad M_G = \frac{\rho S_{\text{эц}} h_{\text{эц}}}{t_c},$$

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

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

$$\frac{dH}{dT_1} = -\bar{G}, \quad (19)$$

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

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

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

на 2-м этапе

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

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

$$\Delta H(T=0) = \Delta H_0,$$

$$L(T=0) = L_{\text{эц}},$$

$$H_r(T=0) = 1 + K_h \Delta H_0, \quad (25)$$

$$\frac{d\Delta H}{dT}(T=0) = \frac{dH_r}{dT}(T=0) = 0, \quad \frac{dL}{dT}(T=0) = 1,$$

$$\frac{dL}{dT}(L=1) \rightarrow 0, \quad (26)$$

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

Условие затопления промплощадки

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

В данной работе выполнен анализ результатов расчетного моделирования по приведенному выше методу. В результате анализа установлено:

1. Расчетная математическая модель представляет систему нелинейных дифференциальных уравнений, не имеющую тривиальных аналитических решений. Поэтому интегрирование 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; 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. Для определения значения приведенного коэффициента гидродинамического сопротивления $\lambda_{\text{гс}}$ проведены вариационные расчеты для выполнения граничного условия затопления промплощадки (1). В результате получено значение $\lambda_{\text{гс}} = 1,8$ (рис. 2). Влиянием скорости попутного ветра пренебрегалось.

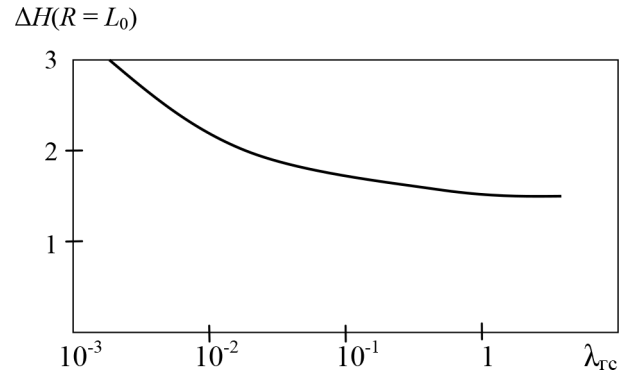


Рис. 2. Зависимость относительной высоты цунами у побережья от приведенного коэффициента гидродинамического сопротивления

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

3. Основные результаты расчетного моделирования средней по проходному сечению скорости распространения и относительной высоты цунами приведены на рис. 3.

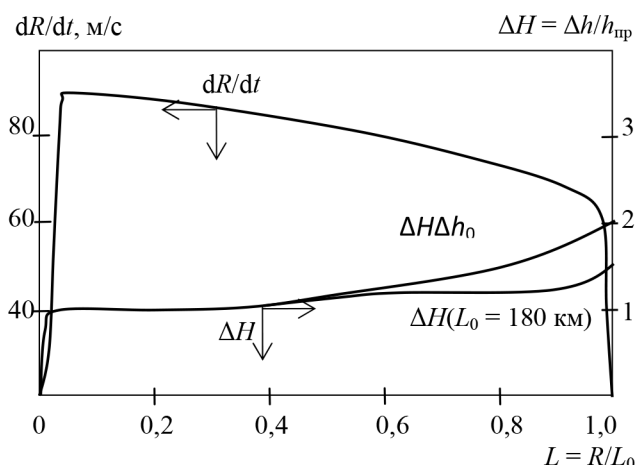


Рис. 3. Основные результаты расчетного моделирования средней скорости и относительной высоты цунами, вызванного землетрясением

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.

4. На основе анализа критериальной формы гидродинамической модели цунами и вариационных расчетов установлена существенная зависимость высоты волны у побережья от критериев C_1 , C_2 и C_3 :

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

Критерий C_1 отражает отношение удельной энергии землетрясения в эпицентре, передаваемой водному объему, к удельной энергии диссипативных необратимых потерь. Критерий C_2 отражает влияние расположения размера эпицентра землетрясения до побережья. Критерий C_3 отражает отношение глубины океана у побережья к глубине океана в эпицентре землетрясения. В частности, при расстоянии от эпицентра до побережья в два раза меньшем, чем до промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi (ориентировочно расположение АЭС Onagawa), высота волны может достигнуть 20 м (см. рис. 3). Результаты расчетного моделирования, а также вариационные расчеты по определению $\lambda_{\text{тс}}$ (см. рис. 2) подтверждают значительное влияние диссипативных гидродинамических потерь на основные параметры цунами.

Проектные и послепроектные оценки максимальной возможной высоты цунами у побережья АЭС Fukushima-Daiichi, проведенные эксплуатирующей организацией ТЕРСО с привлечением компании JSCE, 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 [3].

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 др.), а также с усреднением скорости распространения волны по площади проходного сечения. Решение этих вопросов является перспективой усовершенствования предложенной модели.

Список использованной литературы

1. Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, В. Н. Ващенко, С. С. Яровой. — Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2012. — 280 с.
2. Метод моделирования затопления цунами промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi / В. И. Скалозубов, И. Л. Козлов, Т. В. Габлая, Г. С. Драган, В. Ю. Кочнева // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. — 2013. — Вып. 21. — С. 27–32.
3. IAEA International fact finding expert mission of the nuclear accident following the great east Japan earthquake and tsunami: Preliminary Summary / Tokyo, Fukushima Daiichi NPP, Fukushima Daini NPP and Tokai NPP. — Japan. — 24 may-1 June.

References

1. Analysis of reasons and consequences of accident on АЭС of Fukushima as a factor of prevention of severe accidents in reactors / V. I. Skalozubov, A. A. Kluchnikov, V. N. Vaschenko, S. S. Yarovoy. — Chernobyl : Institut problem bezpeky AES NAN Ukraine (Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants), 2012. — 280 p. (Rus)
2. Tsunami inundation method NPP industrial site in Fukushima-Daiichi / V. I. Skalozubov, I. L. Kozlov, T. V. Gablaia, G. S. Dragan, V. Yu. Kochneva // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyliya (Problems of nuclear power plants and of Chornobyli). — 2013. — Iss. 21. — P. 27–32. (Rus)
3. IAEA International fact finding expert mission of the nuclear accident following the great east Japan earthquake and tsunami: Preliminary Summary Tokyo, Fukushima Daiichi NPP, Fukushima Daini NPP and Tokai NPP. — Japan. — 24 may-1 June.

Отримано 03.02.2014.