

В. И. Скалозубов, В. Н. Ващенко², И. Л. Козлов³, Т. В. Габлая, Т. В. Герасименко²

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, корп. 106, Киев, 03028, Украина

¹ Государственная экологическая академия Украины, ул. Урицкого, 35, Киев, 03035, Украина

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

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗМОЖНОГО ЗАТОПЛЕНИЯ ПРОМПЛОЩАДКИ ЗАПОРОЖСКОЙ АЭС ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ И УРАГАНАХ

Предложена гидродинамическая модель возможного затопления промплощадки Запорожской АЭС при запроектных землетрясениях и ураганах. В отличие от квазистационарного подхода стресс-тестов в предложенной модели учитывается динамический характер процессов затопления, а также непосредственное влияние внешних экстремальных воздействий на Каховское водохранилище. В результате проведенного гидродинамического моделирования определены возможные условия и критерии затопления промплощадки Запорожской АЭС при внешних экстремальных воздействиях.

Ключевые слова: гидродинамическая модель, затопление, землетрясение.

Общие положения

Одним из ключевых вопросов стресс-тестов, результаты которых представлены ГИЯРУ в Национальном отчете Украины [1], является анализ возможности затопления промплощадок АЭС при запроектных сейсмических воздействиях (аналог исходного события большой аварии на АЭС Fukushima-Daichi).

Особенную актуальность эти вопросы имеют для Запорожской АЭС (далее - ЗАЭС), расположенной на высоте 22 м вблизи Каховского водохранилища (нормальный подпорный уровень воды (НПУ) 16 м), которое является составной частью водохранилищ Днепровского каскада ГЭС (Киевская ГЭС, НПУ 103 м; Каневская ГЭС, НПУ 92 м; Кременчугская ГЭС, НПУ 81 м; Днепродзержинская ГЭС, НПУ 64 м; Днепровская ГЭС, НПУ 52 м (рис. 1).

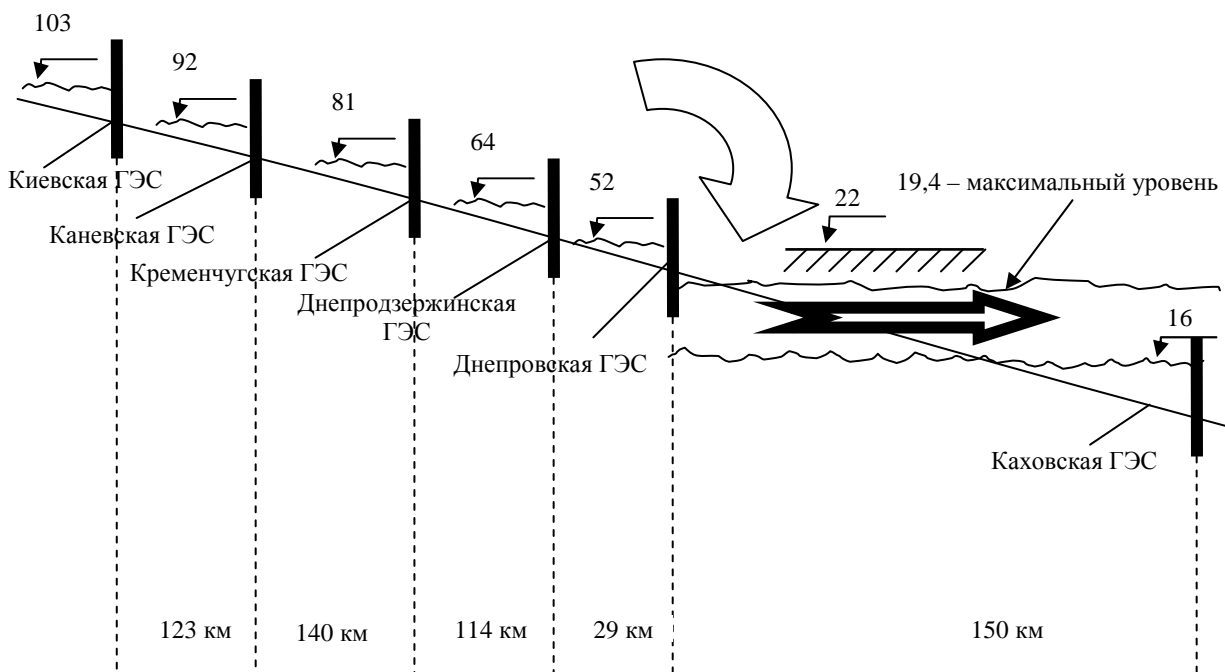


Рис. 1. Модель стресс-тестов возможного затопления пруда-охладителя ЗАЭС [1].

Первым выше Каховского водохранилища, на котором расположена промплощадка ЗАЭС в Днепровском каскаде ГЭС, является Днепровское водохранилище (ДнепроГЭС), построенное еще в 1927 - 1932 гг. с восстановлением гидротехнических сооружений после войны и расположенное на

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

территории Днепропетровской и Запорожских областей. Его общая длина около 129 км, максимальная ширина 7 км, средняя глубина 8 м (максимальная – 53 м), общая площадь около 410 км², общая длина плотины 600 м (рис. 2). Плотины всех вышеперечисленных водохранилищ отнесены к 1-му классу по капитальности и рассчитаны на паводок 0,01 % обеспеченности (повторяемость события один раз в 10000 лет) [2]. Суммарный объем водохранилищ, которые находятся выше Каховского водохранилища, при НПУ около 25,53 км³.



Рис. 2. Плотина Днепропетровского водохранилища.

Площадка ЗАЭС размещена на левобережной, первой надпойменной террасе р. Днепр на Каховском водохранилище (НПУ 16,0 м, объем 18,18 км³) на отметке 22,0 м (см. рис. 1). Расстояние от плотины Днепропетровского водохранилища до пруда-охладителя (НПУ 16,5 м, объем 47 млн м³, площадь поверхности 8,2 км²) и промплощадки ЗАЭС около 77,5 км (рис. 3).

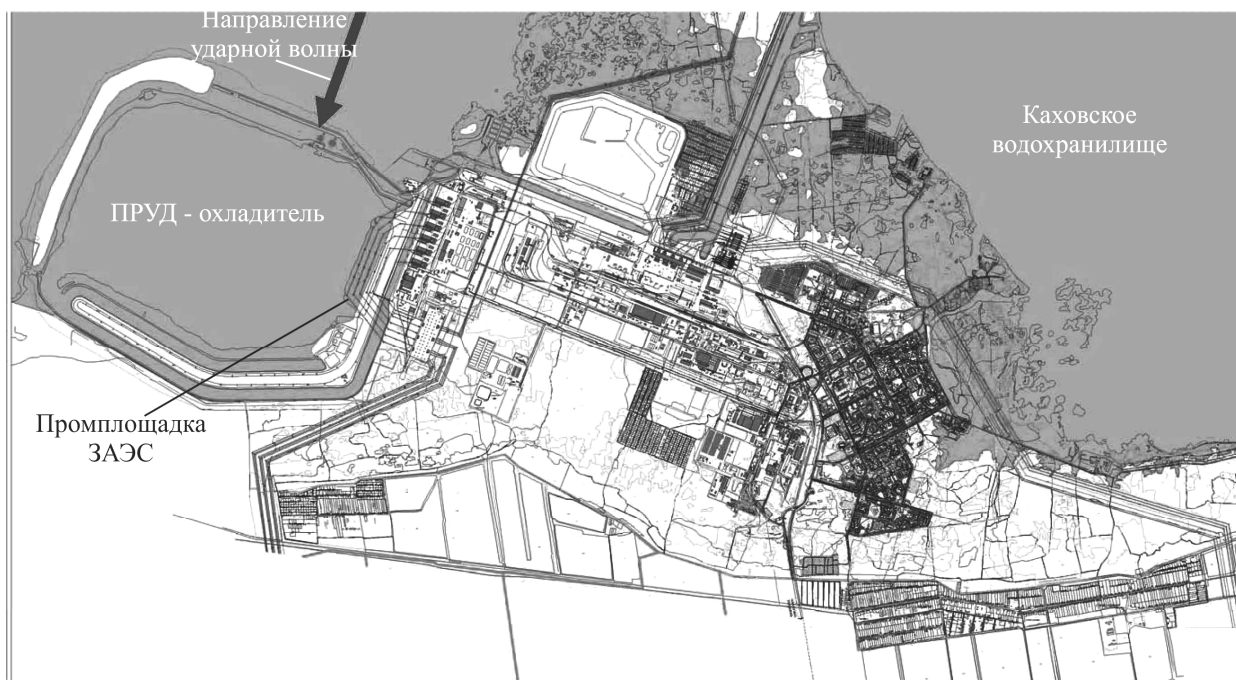


Рис. 3. Зоны возможного затопления пруда-охладителя и промплощадки ЗАЭС [3].

В случае разрушения каскада плотин может при определенных условиях затопить Каховское водохранилище и прилегающие окрестности (в том числе и промплощадку ЗАЭС). Детерминистские оценки событий, связанных с прорывом плотин Днепровского каскада (кроме Каховского водохранилища), были выполнены ранее в дополнительных материалах анализа безопасности ЗАЭС ([3], 1999 г.), в результате которых было определено:

1. Максимально возможный уровень при затоплении в Каховском водохранилище составляет 19,3 – 19,5 м, что ниже отметки промплощадки ЗАЭС (22,0 м). Подъем уровня Каховского водохранилища не окажет прямого воздействия на энергоблоки ЗАЭС. Основная ударная волна при прорыве ДнепроГЭС будет направлена на побережье п. Васильевка, расположенного восточнее промплощадки ЗАЭС (более 60 км).

2. Подверженные влиянию затопления могут быть: плотина пруда-охладителя с комплексом сооружений системы охлаждения основного турбинного оборудования; брызгальные бассейны № 1 и 2; подводный канал; блочные насосные станции № 1 - 6; сооружение продувки и канал подпитки пруда-охладителя. Потенциально уязвимыми к превышению проектного уровня вод (более 18,0 м) на промплощадке ЗАЭС является также оборудование систем, важных для безопасности, расположенных ниже «нулевой» отметки (системы аварийного и планового расхолаживания аварийного ввода бора и охлаждения активной зоны высокого давления; системы аварийной питательной воды, подпитки-продувки 1-го контура, технического водоснабжения общеплощадной дизель-электростанции и др.).

Основным ограничением оценки возможного затопления промплощадки ЗАЭС при разрушении плотин Днепровского каскада в [3] является квазистатическая модель гидравлических процессов, не учитывающая существенно динамический характер, как самого разрушения плотин, так и возможных внешних экстремальных возмущений ("жесткие условия"). Допущения об "однонаправленности" ударной волны от прорыва плотины также не вполне обосновано: ударная волна будет распространяться по всему объему водохранилища (в том числе и в районе промплощадки ЗАЭС). Моделирование возможного затопления Каховского водохранилища, как вторичного события (вызванного запроектным землетрясением), в стресс-тестах осуществлялось при консервативном допущении, что происходит лавинообразное разрушение всех плотин Днепровского каскада ГЭС (кроме Каховской ГЭС) под воздействием запроектного землетрясения. Модель стресс-тестов возможного затопления пруда-охладителя при указанных условиях представлена на рис. 1.

Основные результаты стресс-тестов детерминистского анализа затопления Каховского водохранилища при консервативном сценарии заключаются в следующем:

1) максимальный дополнительный объем воды, поступающий в пруд-охладитель из Каховского водохранилища составляет около 2,0 млн м³, а повышение уровня в пруде-охладителе до отметки 16,7 м происходит в течение около 6 сут:

2) максимально возможная высота волны ветрового нагона составляет 0,9 м при скорости ветра в северо-западном направлении 17 м/с;

3) максимально возможный уровень затопления Каховского водохранилища составляет 19,4 м, что ниже отметки размещения промплощадки ЗАЭС (22,0 м).

На основе полученных результатов в стресс-тестах сделан вывод о том, что *«прямой риск затопления площадки ЗАЭС по причине прорыва/разрушения вследствие землетрясения отсутствует»* [1].

Следует отметить, что моделирование затоплений промплощадки ЗАЭС, вызванных землетрясениями, в стресс-тестах фактически полностью совпадает с результатами анализа внешних затоплений, вызванных возможными авариями гидротехнических сооружений Днепровского каскада водохранилищ, разработанного ранее в финансовом отчете по анализу безопасности (ОАБ) «Вероятностный анализ безопасности для внешних экстремальных воздействий. Энергоблок № 5 ЗАЭС 21.5.59.ОБ.04.03.». Единственное отличие: причиной разрушений гидротехнических сооружений является запроектные землетрясения. Однако согласно заключениям ОАБ неопределенность полученных результатов по внешним затоплениям «...может быть очень велика...», а «...анализ уязвимости объектов ЗАЭС не может быть однозначным...».

Основные *ограничения* применимости модели и результатов анализа возможного затопления промплощадки ЗАЭС при запроектном землетрясении, полученных в стресс-тестах, связаны со следующими положениями:

1. Гидравлические процессы при затоплении Каховского водохранилища фактически рассматриваются в *квазистационарном приближении*: вся поступающая от плотины Днепровской ГЭС

вода «успевает» равномерно растечься по уровню Каховского водохранилища. Такой подход обоснован, если определяющее время поступления воды намного больше определяющего времени повышения уровня в пруде-охладителе. Однако при принятом значении скорости волны прорыва (17 м/с) оценка времени ее достижения пруда-охладителя составляет около 1,5 ч; а по оценкам стресс-тестов время «наполнения» Каховского водохранилища – 6 сут. Таким образом, возможен и существенно нестационарный (динамический) процесс затопления пруда-охладителя. Один из возможных сценариев развития таких событий приведен на рис. 4.

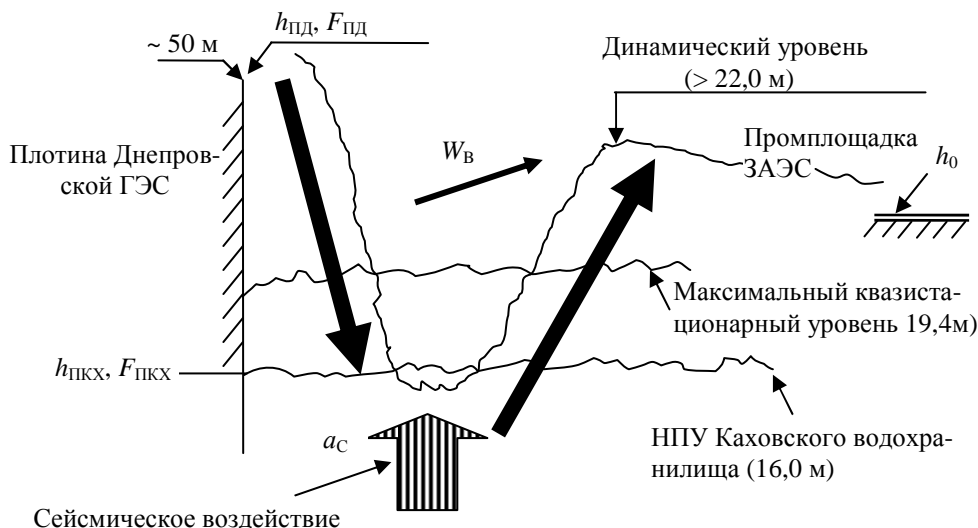


Рис. 4. Гидродинамическая модель затопления промплощадки ЗАЭС при запроектных землетрясениях с откликом ускорения a_c .

2. В модели стресс-тестов затопления Каховского водохранилища влияние внешних экстремальных воздействий (запроектное землетрясение) учитывается только в части разрушения плотин Днепровского каскада ГЭС^{*)}. В действительности скорость и высота волны затопления будет существенно зависеть непосредственно от сейсмического воздействия на объем водохранилища.

Таким образом, основные ограничения применимости моделей и результатов стресс-тестов определяют необходимость дополнительного анализа возможности затопления промплощадки ЗАЭС при запроектных сейсмических и/или атмосферных воздействиях, учитывающего существенную динамичность, инерционность и необратимость процессов; нивелирные факторы и зависимость мощности волны прорыва (скорость, высота волны) непосредственно от воздействия внешних экстремальных событий на водохранилище.

Гидродинамическая модель и анализ результатов

Гидродинамическая модель возможного затопления промплощадки основана на детерминистском методе моделирования затопления промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi [4]. Уникальные данные Фукусимской катастрофы обеспечивают определенный уровень валидации расчетных моделей и перспективу применения для анализа безопасности других площадок при экстремальных природных явлениях.

Основные положения предлагаемой гидродинамической модели возможного затопления промплощадки при запроектных землетрясениях заключаются в следующем:

1. Рассматривается сценарий возможного затопления ударной волной промплощадки ЗАЭС, которая образуется в результате разрушения плотины ДнепроГЭС под воздействием внешних экстремальных событий (запроектные землетрясения), а также непосредственным воздействием этих внешних экстремальных событий на водный объем Каховского водохранилища.

^{*)} Аналогичным недостатком обладает и принятая модель в стресс-тестах «потери конечного поглотителя тепла вследствие разрушения гидротехнических сооружений после прохождения землетрясения»: непосредственное влияние запроектного землетрясения на водный объем может значительно увеличить скорость и глубину осушения Каховского водохранилища.

2. Условно выделяются две стадии возможного затопления:
 стадия формирования ударной волны вблизи разрушенной плотины;
 стадия распространения возникшей ударной волны по Каховскому водохранилищу до побережья промплощадки АЭС и пруда-охладителя.

3. Гидродинамические процессы полагаются изотермическими и диссипацией энергии на тепловые превращения консервативно пренебрегается.

Нестационарная гидродинамическая модель волны затопления с учетом принятых допущений имеет вид:

на стадии формирования ударной волны

$$G_0 = \mu F_{\text{ПД}} \rho \sqrt{2g\Delta H_0}, \quad (1)$$

$$\rho F_{\text{ПД}} \frac{dh}{dt_1} = G_0 - G_{\text{УД}}(t_1), \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt_1} \left(h \frac{dh}{dt_1} \right) = \frac{G_0^2}{\rho^2 F_{\text{ПД}}^2} + g\Delta H_0 + a_c h_{\text{ПД}} - K_{\text{Н}} \left(\frac{dh}{dt_1} \right)^2, \quad (3)$$

$$h(t_1 = 0) = h_{\text{ПКХ}}, \quad (4)$$

$$\frac{dh_t}{dt_1}(t_1 = 0) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{d^2 h_t}{dt_1^2}(t_1 = 0) = a_c; \quad (6)$$

для стадии распространения ударной волны:

$$\frac{d(lhr)}{dt_2} = 0, \quad (7)$$

$$\rho \frac{d}{dt_2} \left[lhr \frac{dr}{dt_2} \right] = \rho_{\text{В}} \left(W_{\text{В}} - \frac{dr}{dt_2} \right)^2 l(t_2)h - \lambda_r \rho \left(\frac{dr}{dt_2} \right)^2 l(t_2)h, \quad (8)$$

$$h(t_2 = 0) = h_{\text{max}}; \quad r(t_2 = 0) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{dr}{dt_2}(t_2 = 0) = \frac{G_{\text{УД}}(h = h_{\text{max}})}{\rho l(r = 0)h_{\text{max}}} = W_{\text{УД}0}, \quad (10)$$

$$\frac{dh(t_2 = 0, h = h_{\text{max}})}{dt_2} = 0. \quad (11)$$

Условие затопления промплощадки

$$\frac{h(r = r_{\text{АЭС}})}{h_0} \geq 1, \quad (12)$$

где t – текущее время процесса; G_0 – расход воды через разрушенную плотину Днепровского водохранилища; μ – приведенный коэффициент расхода через плотину Днепровского водохранилища; $G_{\text{УД}}$ – расход ударной волны; g – ускорение силы тяжести; $F_{\text{ПД}}$ – площадь проходного сечения через плотину Днепровского водохранилища; ρ , $\rho_{\text{В}}$ – плотность воды и ветра соответственно; ΔH_0 – общий нивелирный перепад высот разрушенного Днепровского водохранилища; $h(t)$ – высота волны; l – текущая ширина Каховского водохранилища; r – текущее расстояние ударной волны от плотины ДнепроГЭС; $r_{\text{АЭС}}$ – расстояние до промплощадки ЗАЭС; $W_{\text{В}}$ – скорость попутного ветра; $K_{\text{Н}}$ – приведенный гидродинамический коэффициент диссипации энергии водного объема; λ_r – гидравлический коэффициент трения.

Для области формирования ударной волны в качестве масштабного критерия времени целесообразно использовать продолжительность сейсмического воздействия $\Delta t_{\text{С}}$ с откликом ускорения на грунте $a_{\text{С}}$. Тогда, в критериальной форме гидродинамическая модель стадии формирования ударной волны:

$$\frac{dH}{dT_1} = A_1 \left[1 - \frac{G_{yD}(T_1)}{G_0} \right], \quad (13)$$

$$\frac{d}{dT_1} \left(H \frac{dH}{dT_1} \right) = A_2 - K_H \left(\frac{dH}{dT_1} \right)^2, \quad (14)$$

$$H(T_1 = 0) = A_3 \quad (15)$$

$$\frac{dH}{dT_1}(T_1 = 0) = 0; \quad \frac{d^2H}{dT_1^2}(T_1 = 0) = A_4, \quad (16)$$

где

$$A_1 = \frac{\mu \Delta t_C \sqrt{2g\Delta H_0}}{h_0}; \quad A_2 = \frac{\Delta t_C^2}{h_0^2} \left(\frac{G_0^2}{\rho^2 F_{ПД}^2} + \Delta H_0 + a_C h_{ПД} \right); \quad A_3 = \frac{h_{ПД}}{h_0}; \quad A_4 = \frac{a_C \Delta t_C^2}{h_0};$$

$$H = \frac{h}{h_0}; \quad T_1 = \frac{t_1}{\Delta t_C}.$$

Для стадии распространения ударной волны в качестве временного масштаба целесообразно использовать характерное время достижения волны промплощадки АЭС. Тогда в критериальной форме гидродинамическая модель распространения ударной волны (при консервативном допущении, что скорость ураганного ветра значительно больше скорости распространения волны):

$$\frac{d(LHR)}{dT_2} = 0, \quad (17)$$

$$\frac{d}{dT_2} \left[LHR \frac{dR}{dT_2} \right] = A_5 LH - \lambda_r LH \left(\frac{dR}{dT_2} \right)^2, \quad (18)$$

$$H(T_2 = 0) = H_{\max}; \quad R(T_2 = 0) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{dH}{dT_2}(T_2 = 0) = 0, \quad (20)$$

$$\frac{dR}{dT_2}(T_2 = 0) = 1, \quad (21)$$

$$\text{где } R = \frac{r}{r_{АЭС}}; \quad L = \frac{l}{l_{\max}}; \quad T_2 = \frac{t_2 W_{yD0}}{r_{АЭС}}; \quad A_5 = \frac{\rho_B W_B^2}{\rho W_{yD0}^2}.$$

В общем случае, полученная математическая модель представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, не имеющую аналитических решений. Поэтому расчетное моделирование было выполнено известным методом Рунге - Кутты.

В результате проведенных вариационных расчетов были получены консервативные условия незатопления промплощадки ЗАЭС ударной волной, вызванной землетрясением, сопровождаемым ураганым ветром:

$$K_1 = \frac{\mu \Delta t_C \sqrt{2g\Delta H_0}}{\lambda_r K_H r_{АЭС}} < 10^{-1}, \quad (22)$$

$$K_2 = \frac{a_C \Delta t_C^2}{h_0} < 5 \cdot 10^2, \quad (23)$$

$$K_3 = \frac{\rho_B W_B^2}{2\rho \mu^2 g \Delta H_0} < 5 \cdot 10^{-4}. \quad (24)$$

Выводы

1. Проведенные в отчетах по анализу безопасности и стресс-тестах оценки возможности затопления промплощадки ЗАЭС при запроектных землетрясениях недостаточны, так как не учитывают существенно гидродинамический характер возникновения и распространения ударной волны при внешних экстремальных воздействиях и «жестких» условиях.

2. В рамках принятых допущений разработана гидродинамическая модель формирования и распространения ударной волны, на основе которой определены консервативные критерии затопления промплощадки ЗАЭС при запроектных землетрясениях, сопровождаемых ураганным ветром.

Основные положения модели согласуются с рекомендациями МАГАТЭ по консервативному подходу совместного влияния внешних экстремальных событий на безопасность.

3. Дальнейшее развитие предложенной модели связано с верификацией и анализом неопределенности результатов расчетного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Результаты* проведения стресс-тестов // Национальный отчет Украины. – ГИЯРУ. – 2011.
2. *Правила* эксплуатации водохранилищ Днепровского каскада ГЭС. – К.: Укргидропроект, 1981.
3. *Дополнительные материалы* анализа безопасности Запорожской АЭС. – Харьков: Ин-т «Энергопроект», 1999.
4. *Скалозубов В.И., Козлов И.Л., Габлая Т.В. и др.* Метод моделирования затопления цунами промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2013. - Вип. 21. - С. 27 - 32.

В. І. Скалозубов, В. М. Ващенко¹, І. Л. Козлов², Т. В. Габлая, Т. В. Герасименко¹

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

¹*Державна екологічна академія післядипломної освіти, вул. Урицького, 35, Київ, 03035, Україна*

²*Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченко 1, Одеса, 650044, Україна*

ГІДРОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ МОЖЛИВОГО ЗАТОПЛЕННЯ ПРОММАЙДАНЧИКА ЗАПОРІЗЬКОЇ АЕС ПРИ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ЗЕМЛЕТРУСАХ ТА УРАГАНАХ

Запропоновано гідродинамічну модель можливого затоплення проммайданчика Запорізької АЕС при позапроектних землетрусах і ураганах. На відмінність від квазістаціонарного підходу стрес-тестів запропонованої моделі враховується динамічний характер процесів затоплення, а також безпосередній вплив зовнішніх екстремальних впливів на Каховське водосховище. У результаті проведеного гідродинамічного моделювання визначено можливі умови та критерії затоплення проммайданчика Запорізької АЕС при зовнішніх екстремальних впливах.

Ключові слова: гідродинамічна модель, затоплення, землетрус.

V. I. Skalozubov, V. M. Vaschenko¹, I. L. Kozlov², T. V. Gablaia, T. V. Gerasimenko¹

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Lysogirska str., 12, building 106, Kyiv, 03028, Ukraine

¹*State ecological Academy of postgraduate education and management, Urickogo str., 35, Kyiv, 03035, Ukraine*

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

HYDRODYNAMIC MODELS OF THE POSSIBILITY OF FLOODING ZAPORIZHYA NPP SITE BEYOND THE EXTREME EARTHQUAKES AND HURRICANES

We propose a hydrodynamic model of possible flooding of the industrial site at Zaporozhye NPP design basis earthquakes and hurricane. In contrast to the quasi-stationary approach of stress tests in the proposed model takes into account the dynamic nature of the processes of flooding, as well as a direct impact of external influences on extreme Kakhovske reservoir. As a result of hydrodynamic modeling, the possible conditions and criteria for the flooding of the industrial site at Zaporizhzhya extreme external influences.

Keywords: hydrodynamic model, flooding, earthquake.

REFERENCES

1. *The results of the stress tests* // National Report of Ukraine. – GIYARU. – 2011. (Rus)
2. *Rules of operation of the reservoirs of the Dnieper cascade HPP.* – Kyiv: Ukrhidroproect, 1981. (Rus)
3. *Additional materials safety analysis Zaporizhzhya.* – Kharkov: Institute Energoprojekt, 1999. (Rus)
4. *Skalozubov V. I., Kozlov I.L., Gablaia T.V.et al.* Tsunami inundation method NPP industrial site in Fukushima-Daiichi // Problemy bezpeky atomnyh elektrostantsiy i Chornobyliya (Problems of nuclear power plants and of Chornobyli). - 2013. - Iss. 21. - P. 27 -32. (Rus)

Надійшла 31.01.14

Received 31.01.14