

**В. И. Скалозубов<sup>1</sup>, И. Л. Козлов<sup>2</sup>, Т. В. Габлая<sup>1</sup>, Т. В. Герасименко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, корп. 106, Киев, 03028, Украина*

<sup>2</sup> *Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина*

<sup>3</sup> *Государственная экологическая академия Украины, ул. Урицкого, 35, Киев, 03035, Украина*

## **ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗМОЖНОГО ЗАТОПЛЕНИЯ ПРОМПЛОЩАДКИ ЗАПОРОЖСКОЙ АЭС ПРИ СОВМЕСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ЗАПРОЕКТНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И СМЕРЧА В ПРУДЕ-ОХЛАДИТЕЛЕ**

Анализируется возможность затопления промплощадки Запорожской АЭС (ЗАЭС) при совместном влиянии запроектного сейсмического воздействия и смерча в пруде-охладителе. На основе разработанной гидродинамической модели и расчетных обоснований определены критерии возможного затопления промплощадки ЗАЭС в зависимости от отклика ускорения и длительности сейсмического воздействия, а также мощности смерча в пруде-охладителе и конфигурации промплощадки. Предлагаемые разработки могут быть использованы при реализации Плана мероприятий дальнейшего повышения безопасности энергоблоков АЭС Украины с учетом уроков аварии на АЭС Fukushima-Daiichi, утвержденного эксплуатирующей организацией (ГП НАЭК «Энергоатом») и регулирующим органом (ГИЯРУ).

*Ключевые слова:* гидродинамическая модель; землетрясение; смерч; пруд-охладитель.

Согласно рекомендациям МАГАТЕ и регулирующих органов безопасности ведущих ядерных держав уроки аварии на АЭС Fukushima-Daiichi определили необходимость переоценки безопасности АЭС при совместном воздействии природных экстремальных явлений [1]. На АЭС Fukushima-Daiichi такими совместными воздействиями были запроектные землетрясения и цунами.

### **Основные положения гидродинамической модели возможного затопления промплощадки ЗАЭС при запроектном землетрясении и смерче в пруде-охладителе**

1. Основной причиной возможного затопления промплощадки является одновременное воздействие землетрясения с ускорением  $a_c$  и смерча на пруде-охладителе (рис. 1). Консервативно полагается, что длительность совместного воздействия  $\tau$  определяется максимальной продолжительностью воздействия одного из экстремальных явлений.

2. Основной причиной смерча является газодинамическое столкновение «горячих» и «холодных» потоков воздуха, приводящее к высокоскоростному вращению образовавшейся воздушной массы и возникновению перепада давления  $\Delta P$  в эпицентре смерча. Под воздействием этого перепада давления возникает подъемная сила на поверхности пруда-охладителя.

Перепад атмосферного давления между периферией и центром воронки смерча  $\Delta P$  является определяющей характеристикой класса интенсивности смерчей: каждому диапазону  $\Delta P$  соответствует определенный класс интенсивности смерча [2]. Максимальный перепад давления  $\Delta P_m$  определяется максимальной тангенциальной скоростью ветра  $V_m$  и плотностью воздуха  $\rho_{\text{ВО}}$ :

$$\Delta P_m = \rho_{\text{ВО}} \cdot V_m^2$$

К смерчеопасным зонам относятся территории с интенсивностью выше 2-го класса и условной вероятностью возникновения смерчеопасного события более  $10^{-4}$  1/год для объектов атомной энергетики [2].

В соответствии с каталогом смерчей на бывшей территории Советского Союза [2] за период с 1844 по 2011 г.г. зарегистрировано более 360-ти смерчеопасных событий различных классов интенсивности, в т.ч. и с эпицентрами над водными объемами. С учетом рассматриваемого вопроса особенно можно выделить смерчеопасное событие 1991 г. в Краснодарском крае в районе долины рек Мацеста и Бзугу: смерч интенсивностью 2-го класса поднял уровень воды на 5 метров, привел к большим разрушениям, гибели людей, повреждению линий электропередач и другим серьезным последствиям.

Согласно каталогу [2] территория промплощадки Запорожской АЭС относится к смерчеопасным зонам: класс интенсивности смерча выше 2-го (максимальный перепад давления более 48 ГПа)

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

при условной вероятности смерчопасного события более  $6,0 \cdot 10^{-4}$  1/год. Поэтому с учетом уроков Фукусимской аварии смерчопасные события должны быть рассмотрены и учтены при переоценке безопасности Запорожской АЭС, в т.ч. при совместном воздействии экстремальных природных явлений на затопление промплощадки.

3. Процесс развития волны затопления является изотермическим.

4. Водный объем пруда-охладителя моделируется как сосредоточенная система с осредненными гидродинамическими параметрами.

Гидродинамическая модель возможного затопления промплощадки ЗАЭС при совместном воздействии землетрясения и смерча в пруде-охладителе основана на детерминистском методе моделирования промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi [3]. Уникальные данные Фукусимской катастрофы обеспечивают определенный уровень валидации расчетных моделей и перспективу применения для анализа безопасности других площадок при экстремальных природных явлениях.

Уравнения волны затопления в рамках принятых допущений имеют следующий вид [3]:

$$\rho \frac{d}{dt} \left[ h \frac{dh}{dt} \right] = \Delta P + \rho h a_c - \rho v h \frac{d^2}{dh^2} \left( \frac{dh}{dt} \right), \quad (1)$$

$$h(t=0) = h_{\text{по}}, \quad (2)$$

$$\frac{dh}{dt}(t=0) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{d^2 h}{dt^2}(t=0) = a_c, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность воды;  $h$  – высота волны затопления;  $t$  – время;  $v$  – коэффициент кинематической вязкости воды.



Рис.1. Условия возникновения внешних экстремальных событий в пруде-охладителе ЗАЭС.

После преобразований формул (1) – (4) уравнение волны затопления в критериальной форме

$$\frac{dH}{dT} \frac{d^2 H}{dT^2} = K_1 + K_2 - K_3 \frac{d}{dT} \left[ \frac{d^2 H}{dT^2} \left( \frac{dH}{dT} \right)^{-1} \right]. \quad (5)$$

Начальные условия следующие:

$$H(T=0) = 1, \quad (6)$$

$$\frac{dH}{dt}(T=0) = 0, \tag{7}$$

$$\frac{d^2H}{dT^2}(T=0) = K_5. \tag{8}$$

Условие затопления промплощадки

$$H_3 = \frac{h_{no}}{h_0} H \geq 1, \tag{9}$$

где  $H = h/h_{no}$ ;  $T = t/\tau$ ;  $h_0$  – высота расположения промплощадки;  $h_{no}$  – нормальный подпорный уровень воды в пруде-охладителе.

### Анализ полученных результатов

Численное интегрирование системы нелинейного дифференциального уравнения (5) при начальных условиях (6) – (9) осуществлялось методом Рунге - Кутты 4-го порядка точности [2, 3].

В результате проведенных вариационных расчетов численного интегрирования гидродинамической модели (5) – (9) при изменении определяющих параметров землетрясения и смерча установлено, что критерием затопления промплощадки при одновременном землетрясении и смерче в пруде-охладителе являются

$$K = \frac{K_1 + K_2}{K_3} = \frac{\Delta P / \rho + a_c h_{no} \tau}{\nu} \tag{10}$$

Консервативное условие затопления промплощадки ЗАЭС ( $h_{no}/h_0 \approx 0,7$ ) при совместном воздействии землетрясения и смерча в пруде-охладителе (рис. 2) определяется как

$$K = \frac{\Delta P / \rho + a_c h_{no} \tau}{\nu} \geq 2,0 \cdot 10^{10}. \tag{11}$$

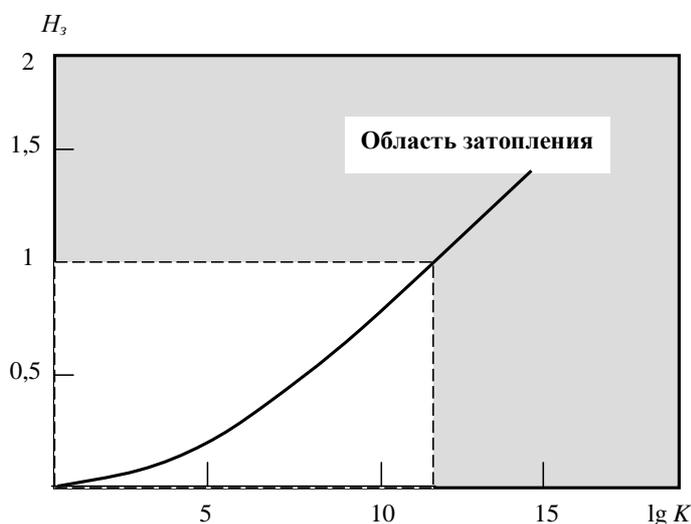


Рис. 2. Область затопления промплощадки ЗАЭС при совместном воздействии землетрясения и смерча в пруде-охладителе.

В частности, при отсутствии смерча и длительности сейсмического воздействия порядка 100 с допустимое консервативное значение отклика ускорения – 1,0 g магнитуд. Это значение существенно превышает даже запроектные условия сейсмических нагрузок при квалификации и анализе безопасности систем ЗАЭС в «постфукусимский» период.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Национальный отчет по результатам проведения «стресс-тестов» оценки безопасности АЭС Украины / ГИЯРУ, 2011.*
2. *Руководство по безопасности РБ-022-01. Рекомендации по оценке характеристик смерча для объектов использования атомной энергетики / Госатомнадзор России. - 2002.*
3. *Скалозубов В.И., Козлов И.Л., Габляя 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<sup>1</sup>, І. Л. Козлов<sup>2</sup>, Т. В. Габляя<sup>1</sup>, Т. В. Герасименко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, корп. 106, Київ, 03028, Україна*

<sup>2</sup> *Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченко 1, Одеса, 65044, Україна*

<sup>3</sup> *Державна екологічна академія післядипломної освіти, вул. Урицького, 35, Київ, 03035, Україна*

**ГІДРОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ МОЖЛИВОГО ЗАТОПЛЕННЯ ПРОММАЙДАНЧИКА ЗАПОРІЗЬКОЇ АЕС ПРИ СПІЛЬНОМУ ВПЛИВІ ПОЗАПРОЕКТНОГО ЗЕМЛЕТРУСУ ТА СМЕРЧУ В СТАВКУ-ОХОЛОДЖУВАЧІ**

Проаналізовано можливість затоплення проммайданчика Запорізької АЕС при спільному впливі позапроектної сейсмічної дії та смерчу в ставку-охолоджувачі. На основі розробленої гідродинамічної моделі та розрахункових обґрунтувань визначено критерії можливого затоплення проммайданчика Запорізької АЕС залежно від відгуку прискорення та тривалості сейсмічної дії, а також потужності смерчу в ставку-охолоджувачі та конфігурації проммайданчика. Запропоновані розробки можуть бути використані в реалізації Плану дій для подальшого підвищення безпеки енергоблоків АЕС України з урахуванням уроків аварії на АЕС Fukushima-Daiichi, затвердженого експлуатаційною організацією (ДП НАЕК "Енергоатом") та регулюючим органом (ДІЯРУ).

*Ключові слова:* гідродинамічна модель, землетрус, смерч, ставок-охолоджувач.

**V. I. Skalozubov<sup>1</sup>, I. L. Kozlov<sup>2</sup>, T. V. Gablaya<sup>1</sup>, T. V. Gerasimenko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Lysogirska str., 12, building 106, Kyiv, 03028, Ukraine*

<sup>2</sup> *Odesa National Polytechnic University, Shevchenko pr., 1, Odesa, 65044, Ukraine*

<sup>3</sup> *State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management, Uritskogo str., 35, Kyiv, Ukraine*

**HYDRODYNAMIC MODEL OF POSSIBLE FLOODING OF AN INDUSTRIAL PLATFORM OF THE ZAPOROZHYE NUCLEAR POWER PLANT AT JOINT IMPACT OF A BEYOND DESIGN BASIS EARTHQUAKE AND A TORNADO IN A POND COOLER**

In offered article authors analyze possibility of flooding of an industrial platform of the Zaporozhye nuclear power plant at joint beyond design seismic and a tornado influence. On the basis of the developed hydrodynamic model and calculated feasibility criteria of possible flooding of an industrial platform of the Zaporozhye nuclear power plant depending on a response of acceleration and duration of seismic influence and also on the tornado power in the pond cooler and configuration of an industrial platform are defined. The offered study can be used by the implementation of the Plan of measures for further safety improvement of power units of the Ukrainian nuclear power plants taking into account accident lessons on the Fukushima-Daiichi nuclear power plant, approved by the operating organization (GC NNEGC "Energoatom") and regulator (SNRCU).

*Keywords:* hydrodynamic model, earthquake, tornado, pond cooler.

REFERENCES

1. *National report. Results of realization "stress tests" //State inspection of the nuclear adjusting of Ukraine. — 2011.*
2. *Guidance on safety of RB-022-01. To recommendation as evaluated by descriptions of tornado for the objects of the use of atomic energy of / Gosatomnadzor Russia. - 2002. (Rus)*
3. *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 Chornobylya (Problems of nuclear power plants and of Chornobyl). - 2013. - Iss. 21. - P. 27 - 32. (Rus)*

Надійшла 07.05.14

Received 07.05.14