

- [Текст] / М. М. Биченок, С. П. Іванюта, Є. О. Яковлев // Екологія і Ресурси: Зб. наук. праць Інституту проблем національної безпеки. – 2007. – № 17. – С. 33–42.
6. Лещинський, О. Л. Економічний ризик та методи його вимірювання [Текст] / О. Л. Лещинський, О. В. Школьнік. – К. : «Дельта», 2005. – 112 с.
  7. Bernstein, P. L. Against the Gods: the Remarkable Story of Risk [Text] / P. L. Bernstein. – John Wiley & Sons, 1996. – 383 p.
  8. Morgan, M. G. Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis [Text] / M. G. Morgan, M. Henrion. – Cambridge University Press, Cambridge, 1990. – 344 p.
  9. Качинський, А. Б. Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи [Текст] / А. Б. Качинський. – К. : ІПНБ, НАСБУ, 2004. – 472 с.
  10. Beck, U. World Risk Society [Text] / U. Beck. – Cambridge: Polity Press, 1998. – 425 p.
  11. Горбулін, В. П., Качинський, А. Б. Системно-концептуальні засади стратегії національної безпеки України [Текст] / В. П. Горбулін, А. Б. Качинський. – К : ДП «Євроатлантикінформ», 2007. – 592 с.

*Запропонована гідродинамічна модель хвилі затоплення промплощадки АЕС при смерчах і землетрусах, що заснована на припущеннях формування хвилі затоплення під дією підйомної сили смерчу і сейсмічного поштовху, а також сил гравітації і внутрішньої дисипації. На основі запропонованої гідродинамічної моделі визначені детерміністські критерії можливого затоплення промплощадки АЕС за умов спільної дії смерчу і землетрусу в ставку-охолоджувачі (пристанційному водосховищі)*

*Ключові слова: атомні електростанції (АЕС), затоплення, землетрус, смерч, ставок-охолоджувач, гідродинамічна модель, промплощадка АЕС*

*Предложена гидродинамическая модель волны затопления промплощадки АЭС при смерчах и землетрясениях, основанная на допущениях формирования волны затопления под действием подъемной силы смерча и сейсмического толчка, а также сил гравитации и внутренней диссипации. На основе предлагаемой гидродинамической модели определены детерминистские критерии возможного затопления промплощадки АЭС при совместном воздействии смерча и землетрясения в пруде-охладителе (пристанционном водохранилище)*

*Ключевые слова: атомные электростанции (АЭС), затопление, землетрясение, смерч, пруд-охладитель, гидродинамическая модель, промплощадка АЭС*

УДК 621.039

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.42146

# КРИТЕРИИ ЗАТОПЛЕНИЯ ПРОМПОЩАДОК АЭС СОВМЕСТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ СМЕРЧЕЙ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ПРУДЕ-ОХЛАДИТЕЛЕ

**И. Л. Козлов**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра технологии воды и топлива  
Одесский национальный  
политехнический университет  
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044  
E-mail: i.l.kozlov@yandex.ua

## 1. Введение

Необходимость пересмотра общепринятого в мировой практике отношения к маловероятным аварийным событиям является одним из главных уроков большой аварии на АЭС Fukushima-Daiichi. Ядерные державы под эгидой МАГАТЭ пришли к однозначному выводу по пересмотру (переоценке) состояния безопасности всех действующих энергоблоков АЭС с учетом основных причин и уроков большой аварии [1].

Одной из основных причин большой аварии на АЭС Fukushima-Daiichi, приведшей к катастрофическим экологическим последствиям, была недостаточность обеспечения защищенности промплощадки и конструкций атомных энергоблоков от внешних экс-

тremальных воздействий (запроектных землетрясений и цунами), приведших к затоплению и полной потере длительного электроснабжения собственных нужд [2].

Согласно рекомендациям МАГАТЭ в Украине регулирующий орган: Государственная инспекция ядерного регулирования Украины (ГИЯРУ) и эксплуатирующая организация: Государственное предприятие, Национальная атомная энергогенерирующая компания "Энергоатом" (ГП НАЭК "Энергоатом") разработали и приняли План мероприятий по выполнению целевой внеочередной проверки и дальнейшего повышения безопасности АЭС с учетом событий на АЭС Fukushima-Daiichi [3]. Одним из базовых краткосрочных мероприятий этого Плана было проведение

стресс-тестов переоценки безопасности, основная цель которых связана с экспресс-оценкой текущего состояния безопасности и обоснованием дополнительных долгосрочных мероприятий по дальнейшему повышению безопасности АЭС Украины с учетом уроков большой аварии на АЭС Fukushima-Daiichi.

Проведенные ГИЯРУ "стресс-тесты" (начальный этап) по переоценке безопасности действующих реакторных установок фактически не определили новые "дефициты" безопасности. Одной из возможных причин полученных результатов "стресс-тестов" является фактическое отсутствие достаточно обоснованных методов моделирования таких относительно маловероятных событий, как затопление промплощадок АЭС совместным воздействием внешних экстремальных явлений.

---

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

---

Основные результаты стресс-тестов переоценки безопасности действующих украинских энергоблоков АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) отражены в Национальном отчете Украины "Результаты стресс-тестов" от 2011 г. [4] и заключаются в следующем:

1) не выявлены дополнительные к проекту дефициты безопасности и комбинации внешних экстремальных воздействий (в т.ч. смерчи и землетрясения), которые значительно влияют на безопасность;

2) проекты энергоблоков АЭС с ВВЭР, а также реализованный и реализуемый комплекс отраслевых мероприятий по повышению безопасности определяют значительные "запасы" безопасности, в том числе и по отношению к внешним экстремальным воздействиям.

При оценке воздействия смерчей в рамках отчетов по анализу безопасности (ОАБ) и стресс-тестах консервативно полагалось, что смерч любого класса интенсивности приводит к тяжелой аварии (с повреждение ядерного топлива), однако относительно небольшой вклад (около 10 %) в суммарную базовую частоту повреждения активной зоны (ЧПАЗ) определил низкий приоритет актуальности соответствующих противоаварийных организационно-технических мероприятий [5, 6].

Возможность затопления промплощадок АЭС в стресс-тестах оценивались в квазистатическом приближении разлива водохранилищ при разрушении плотин/дамб от сейсмических воздействий [7]. В отношении же землетрясений принято решение о пересмотре квалификации оборудования, строений и систем при сейсмических запроектных воздействиях. При этом методическое обеспечение анализа сейсмоопасности в качестве определяющего параметра использует так называемый "отклик ускорения" воздействия землетрясения на поверхности грунта [5].

Относительно известных результатов [6] оценки воздействия смерчей и землетрясений на возможность затопления промплощадок АЭС (аналог исходного события Фукусимской аварии, вызванного совместным воздействием экстремальных природных явлений) необходимо отметить:

1. При анализе влияния землетрясений не учитывалось непосредственное сейсмическое воздействие на

водные объемы водохранилищ и прудов-охладителей АЭС, а также возможный, существенно динамический, характер процессов развития волн затопления.

2. Оценки вероятности возникновения критических для безопасности смерчей в большинстве случаев противоречат общепринятым характеристикам зон смерчеопасности расположения АЭС [8]. Так, для района промплощадки Запорожской АЭС (зона повышенной смерчеопасности «Б» с расчетно-статистическим классом интенсивности смерча 3,58 при вероятности возникновения более  $10^{-4}$  1/год [8]) суммарная вероятность, возникновения смерчей всех классов интенсивности, составляет  $6,18 \times 10^{-6}$  1/год. Именно такие заниженные оценки вероятности возникновения смерчей (даже при консервативных допущениях влияния на ЧПАЗ) привели, в конечном итоге, и к низким приоритетам соответствующих противоаварийных организационно-технических мероприятий. Кроме того, не анализировалась возможность затопления промплощадки АЭС при непосредственном воздействии смерчей на водные объемы водохранилищ/прудов-охладителей. Например, согласно известным событиям в Краснодарском крае в 1991 г. высота волны затопления составила около 5 м под воздействием смерча 2-го класса интенсивности [8].

3. Согласно рекомендации МАГАТЭ по учету уроков Фукусимской аварии (см., например, [7]) при анализе экстремальных природных явлений на безопасность АЭС необходимо также рассматривать и относительно маловероятные события (в т.ч. и совместное воздействие смерчей и землетрясений).

Таким образом, актуальным является детерминистская переоценка возможности затопления промплощадок АЭС при совместном (в общем случае) непосредственном воздействии смерчей и землетрясений на водные объемы пристанционных прудов-охладителей/водохранилищ.

---

## 3. Цель и задачи исследования

---

Целью работы является дополнительный анализ и разработка методов гидродинамического моделирования возможного затопления промплощадки АЭС при совместном воздействии природных экстремальных явлений.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

– моделирование условий и принципов формирования волны затопления промплощадки АЭС при совместном воздействии смерча и землетрясения в пруде-охладителе;

– расчет консервативных критериев затопления промплощадок АЭС при землетрясении и смерче в районе пруда-охладителя.

---

## 4. Гидродинамическая модель формирования волны затопления промплощадки АЭС при совместном воздействии смерча и землетрясения в районе пруда-охладителя

---

Основные положения гидродинамической модели волны затопления промплощадки АЭС при со-

вместном воздействии смерча и землетрясения в пруде-охладителе следующие:

1. Формирование волны затопления в общем случае происходит под действием подъемной силы смерча и сейсмического толчка, а также сил внутренней диссипации и гравитации.

Подъемная сила смерча  $F_c$  определяется перепадом давления в эпицентре и на периферии смерча ( $\Delta P$ ), вызванном высокоскоростным вращательным движением разноплотностных слоев воздуха, и площадью контакта смерча с поверхностью воды пруда-охладителя  $S_c$  [8]:

$$F_c = \Delta P \times S_c.$$

Ускорение подъемной силы землетрясения определяется ускорением отклика сейсмического воздействия на поверхности дна пруда-охладителя  $a_3$  с длительностью толчков  $\Delta t_3$ .

2. Волна затопления моделируется цилиндрической формой с площадью сечения  $S_c$  и высотой  $h+h_{no}$  (рис. 1).

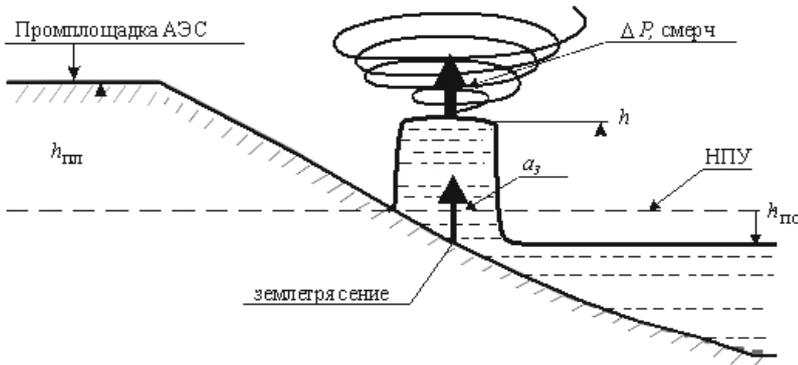


Рис. 1. Модель волны затопления промплощадки АЭС под совместным воздействием смерча и землетрясения в пруде охладителе: НПУ – номинальный подпорный уровень пруда-охладителя,  $h$  – высота волны над НПУ;  $h_{no}$  – снижение уровня в “невозмущенной” смерчем поверхности пруда-охладителя;  $h_{пл}$  – высота расположения промплощадки АЭС над НПУ

3. Площадь  $S_c$  и удельная (на единицу поверхности) подъемная сила ( $\Delta P$ ) смерча определяется в соответствии с классом интенсивности смерча [8].

4. Консервативно полагается, что максимальное воздействие смерча над прудом-охладителем происходит непосредственно вблизи побережья промплощадки АЭС; т.к. высота волны затопления, вызванная смерчем вдали от побережья промплощадки, зависит также от “транспортной” диссипации энергии смерча и волны до побережья промплощадки.

5. Процесс возникновения и развития волны затопления условно разбивается на два разномасштабных по времени этапа:

– начальный этап совместного воздействия смерча и землетрясения с масштабом времени  $\Delta t_3$ ;

– завершающий этап воздействия смерча с масштабом времени  $\Delta t_c$ .

6. Процесс возникновения и развития волны затопления полагается изотерическим (в т. ч. без учета эффектов межфазного теплообмена); а скорость распространения возмущения в воде значительно больше скорости изменения высоты волны.

### 5. Расчет консервативных критериев затопления промплощадок АЭС при землетрясении и смерче в районе пруда-охладителя

С учетом принятых положений и допущений гидродинамическая модель затопления промплощадки АЭС при совместном воздействии смерча и землетрясения имеет вид:

$$\begin{aligned} \rho \cdot S_c \frac{d}{dt} \left[ (h+h_{no}) \cdot \frac{d(h+h_{no})}{dt} \right] = \\ = \Delta P \cdot S_c - \rho \sqrt{\pi S_c} \cdot v \cdot h \frac{d}{dh} \left[ \frac{d(h+h_{no})}{dt} \right] - \\ - \rho \sqrt{\pi S_c} \cdot v \cdot (h+h_{no}) \frac{d}{dh} \left[ \frac{d(h+h_{no})}{dt} \right] - \rho g (h+h_{no}) S_c, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{dh_{no}}{dt} = -\bar{S} \cdot \frac{dh}{dt}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность воды;  $t$  – текущее время;  $\pi=3,14\dots$ ;  $v$  – кинематический коэффициент вязкости воды;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\bar{S}=1/(S_{no}/S_c-1)$ ;  $S_{no}$  – невозмущенная смерчем площадь поверхности пруда-охладителя.

Начальные условия:

$$h(t=0) = h_{no}(t=0) = 0,$$

$$\frac{dh}{dt}(t=0) = \frac{dh_{no}}{dt}(t=0) = 0,$$

$$\frac{d^2h}{dt^2}(t=0) = a_3, \quad (3)$$

$$\frac{d^2h}{dh^2}(0 < t \leq \Delta t_3) = \frac{d^2h}{dt^2}(t) + a_3. \quad (4)$$

Условие затопления волной промплощадки:

$$h \geq h_{пл}. \quad (5)$$

Введем безразмерные параметры моделирования:

$$T = \frac{t}{t_M}; \quad t_M = \begin{cases} \Delta t_3 (t \leq \Delta t_3); & H = \frac{h}{h_{пл}}, \\ \Delta t_c (t > \Delta t_3); & H_{no} = \frac{h_{no}}{h_{пл}}. \end{cases}$$

В безразмерной форме уравнение (1) после преобразования имеет вид:

$$\begin{aligned} (1-\bar{S}) (H+H_{no}) \cdot \frac{dH}{dT} \cdot \frac{d^2H}{dT^2} + (1-\bar{S})^2 \left( \frac{dH}{dT} \right)^3 + \\ + \frac{t_M}{h_{пл}} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{S_c}} \cdot v (H+H_{no}) \frac{d^2H}{dT^2} + \\ + \frac{t_M^2 g}{h_{пл}} (H+H_{no}) \cdot \frac{dH}{dT} - \frac{t_M^2}{h_{пл}^2} \cdot \frac{\Delta P}{\rho} \cdot \frac{dH}{dT} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Временной масштаб завершающего этапа воздействия смерча может быть определен из условия:

$$\frac{\Delta t_c}{h_{пл}} \sqrt{\frac{\pi}{S_c}} \cdot v = 1. \tag{7}$$

В общем случае временной масштаб:

$$t_M = \begin{cases} \Delta t_3 (t \leq \Delta t_3), \\ \sqrt{\frac{h_{пл}^2 \cdot S_c}{\pi v^2}} (t > \Delta t_3). \end{cases} \tag{8}$$

Таким образом, с учетом преобразований гидродинамическая модель волны затопления промплощадки при воздействии смерча совместно с землетрясением в пруде-охладителе (1)–(4) в критериальной форме имеет вид:

$$\begin{aligned} &K_{\bar{S}}(H+H_{но}) \cdot \frac{dH}{dT} \cdot \frac{d^2H}{dT^2} + K_{\bar{S}}^2 \cdot \left(\frac{dH}{dT}\right)^3 + \\ &+ K_v(H+H_{но}) \cdot \frac{d^2H}{dT^2} + \\ &+ K_g(H+H_{но}) \cdot \frac{dH}{dT} - K_c \cdot \frac{dH}{dT} = 0; \end{aligned} \tag{9}$$

$$\frac{dH_{но}}{dT} = (K_{\bar{S}} - 1) \frac{dH}{dT}; \tag{10}$$

$$H(T=0) = H_{но}(T=0) = \frac{dH}{dT}(T=0) = \frac{dH_{но}}{dT}(T=0) = 0; \tag{11}$$

$$\frac{d^2H}{dT^2}(T=0) = K_3; \tag{12}$$

$$\frac{d^2H}{dT^2}(0 < t \leq \Delta t_3) = \frac{d^2H}{dT^2}(T) + K_3, \tag{13}$$

где критерии:

$$K_{\bar{S}} = (1 - \bar{S}),$$

$$K_v = \begin{cases} \frac{\Delta t_3 \cdot v}{h_{пл}} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{S_c}}, & t \leq \Delta t_3, \\ 1, & t > \Delta t_3, \end{cases}$$

$$K_g = \begin{cases} \frac{g \Delta t_3^2}{h_{пл}}, & t \leq \Delta t_3, \\ \frac{g h_{пл} S_c}{\pi v^2}, & t > \Delta t_3, \end{cases}$$

$$K_c = \begin{cases} \frac{\Delta P}{\rho} \cdot \frac{\Delta t_3^2}{h_{пл}^2}, & t \leq \Delta t_3, \\ \frac{\Delta P}{\rho} \cdot \frac{S_c}{\pi v^2}, & t > \Delta t_3, \end{cases}$$

$$K_3 = \frac{a_c \Delta t_3^2}{h_{пл}}.$$

Критерий  $K_{\bar{S}}$  отражает соотношение между площадью охва-

ченной смерчем и общей площадью поверхности пруда-охладителя. Диссипативный критерий  $K_v$  отражает воздействие сил вязкостного трения на формирование волны затопления. Критерий  $K_g$  отражает отношение удельной энергии сейсмического воздействия к необходимой работе по формированию волны затопления. Критерий  $K_c$  отражает отношение удельной энергии смерча к необходимой работе по формированию волны затопления. “Сейсмический” критерий  $K_3$  отражает отношение мощности землетрясения к необходимой удельной работе по сейсмическому возбуждению водяного столба на поверхности пруда-охладителя.

Условие затопления промплощадки:

$$H \geq 1. \tag{14}$$

Гидродинамическая модель (9)–(13) формально представляет систему нелинейных дифференциальных уравнений, не имеющей в общем случае тривиальных аналитических решений. Решения могут быть получены “численными” методами интегрирования.

## 6. Анализ результатов расчетного моделирования

Расчетное моделирование процессов возможного затопления промплощадки АЭС при совместном воздействии смерча и землетрясения в пруде-охладителе проводилось на примере Запорожской АЭС (рис. 2) при  $h_{пл} = 6,0$  м,  $\bar{S} \gg 1$  и без учета эффективного противодействия природных и техногенных систем.

Интегрирование системы нелинейных дифференциальных уравнений (9)–(13) проводилось модернизированным методом Рунге–Кутты (например, [9]) для условий 2-го, 3-го и 4-го класса интенсивностей смерчей в соответствии с рекомендациями [8]). Основные результаты расчетного моделирования приведены на рис. 3, а–в, анализ которых позволяет сделать следующие выводы:

1. Влияние землетрясений в пруде-охладителе на затопление промплощадки можно условно разбить на три области: область незначительного влияния сейсмического воздействия ( $K_3 \leq 10^2$ ) область значительного влияния сейсмического воздействия ( $10^2 < K_3 \leq 4 \cdot 10^2$ ); область определяющего сейсмического воздействия ( $K_3 \geq 10^2$ ).

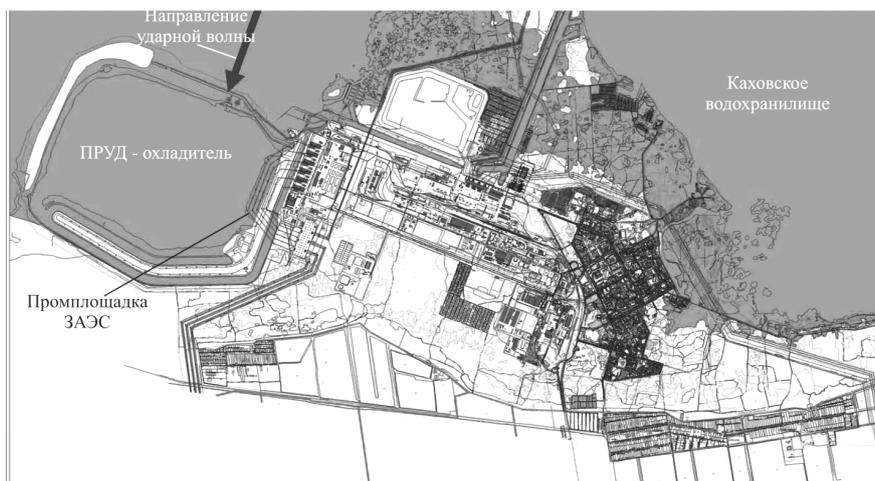


Рис. 2. Зоны возможного затопления пруда-охладителя и промплощадки ЗАЭС [7]

Например, значения  $K_3 \approx 4 \times 10^2$  соответствуют условиям «фукусимского» затопления промплощадки АЭС цунами, вызванного землетрясением уровня 9 баллов [11].

Критерий сейсмоопасности затопления промплощадки  $K_3$  линейно зависит от отклика ускорения землетрясения  $a_3$  и более существенно от продолжительности сейсмических толчков ( $\Delta t_3^2$ ). Так, для области значительного влияния сейсмического воздействия на затопление промплощадки при продолжительности толчков не более 10 сек. предельно допустимое значение отклика ускорения 1,0 g; а для  $\Delta t_3 \approx 100$  с – 0,01 g.

Также определяющие зависимости критериев сейсмоопасности от  $a_3$  и  $\Delta t_3^2$  необходимо учитывать при переоценке квалификации оборудования, строений и систем АЭС под воздействием сейсмических нагрузок и других подобных задач.

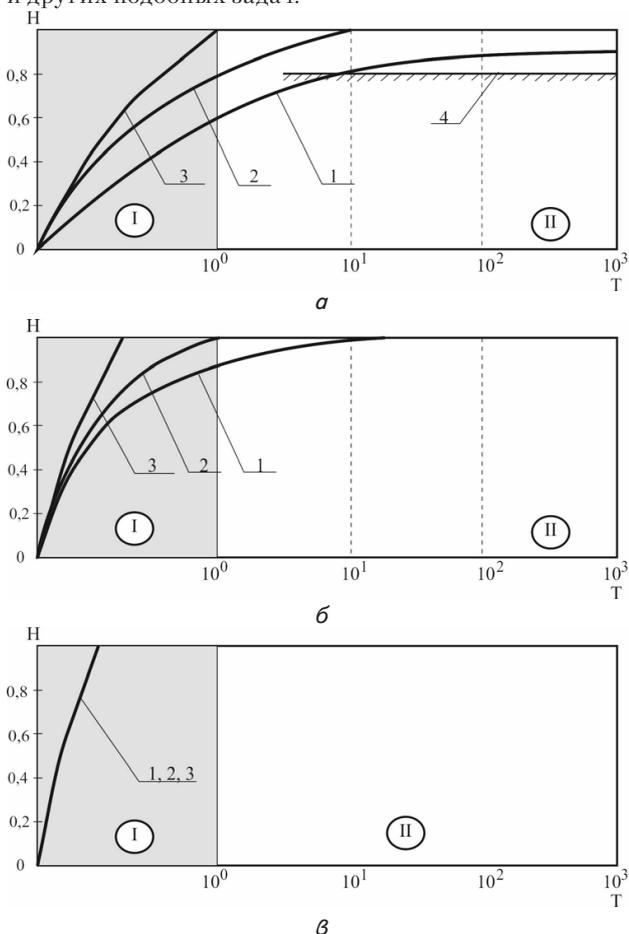


Рис. 3. Результаты расчетного моделирования условий затопления промплощадки ЗАЭС под совместным воздействием смерча и землетрясения в пруде-охладителе: а –  $K_3 \leq 10^2$ ; б –  $K_3 = 2 \times 10^2$ ; в –  $K_3 = 4 \times 10^2$

- 1) расчетный класс интенсивности вероятного смерча –  $k_p = 2$ ;
- 2) расчетный класс интенсивности вероятного смерча –  $k_p = 3$ ;
- 3) расчетный класс интенсивности вероятного смерча –  $k_p = 4$ ;
- 4) зафиксированная в 1991 г. высота волны под воздействием смерча 2-го класса [8];

Ⓘ – область совместного действия смерча и землетрясения;

Ⓜ – область действия смерча.

2. В области незначительного влияния сейсмического воздействия на затопление промплощадки предельно допустимым является смерч 2-го класса интенсивности. Расчетные значения высоты волны затопления этого класса смерчей удовлетворительно коррелируют с зафиксированными данными в 1991 г. [8] (рис. 3, а).

При более высоких классах интенсивности смерчей затопление промплощадки может происходить вне зависимости от сейсмического воздействия.

## 7. Выводы

1. Проведенные в отчетах по анализу безопасности и стресс-тестах оценки возможности затопления промплощадок АЭС при запроектных землетрясениях недостаточны, так как не учитывают существенно гидродинамический характер формирования волны затопления при совместном воздействии смерча и землетрясения в пруде-охладителе.

2. В рамках принятых допущений разработана гидродинамическая модель формирования и развития волны возможного затопления, на основе которой определены консервативные критерии затопления промплощадок АЭС при землетрясении и смерче в районе пруда-охладителя.

3. Результатами расчетного моделирования процессов возможного затопления промплощадок АЭС при совместном воздействии смерча и землетрясения в пруде-охладителе на примере Запорожской АЭС:

– выделены консервативные условия области влияния сейсмического воздействия ( $K_3 \leq 10^2$  – область незначительного воздействия;  $10^2 < K_3 \leq 4 \times 10^2$  – область значительного воздействия;  $K_3 \geq 10^2$  – область определяющего сейсмического воздействия);

– для области значительного влияния сейсмического воздействия определено предельно допустимое значение отклика ускорения 1,0 g при продолжительности толчков не более 10 сек., а для продолжительности толчков  $\approx 100$  с – 0,01 g;

– в области незначительного влияния сейсмического воздействия на затопление промплощадки предельно допустимым является смерч 2-го класса интенсивности. Расчетные значения высоты волны затопления этого класса смерчей составляет  $\approx 5,4$  м.

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

## Литература

1. IAEA International Fact Finding Expert Mission Of The Fukushima Dai-Ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami: IAEA Mission Report [Text] / IAEA, 2011. – 160 p.
2. Скалозубов, В. И. Повышение экологической безопасности атомной энергетики Украины в постфукусимский период: монография [Текст] / В. И. Скалозубов,

- В. Н. Ващенко, А. А. Гудима, Т. В. Герасименко, Т. В. Габляя, И. Л. Козлов. – Чернобыль: Ин-т проблем безпеки АЕС НАН України, 2012. – 280 с.
3. Щодо Плану дій з виконання цільової позачергової перевірки та подальшого підвищення безпеки АЕС України з урахуванням подій на Фукусіма-1 [Текст] / Колегія Держатомрегулювання, № 2 від 19.05.11 р.
  4. Национальный отчет по результатам проведения «стресс-тестов» оценки безопасности АЭС Украины [Текст] / ГИЯРУ, 2011.
  5. Скалозубов, В. И. Научно-технические основы мероприятий повышения безопасности АЭС с ВВЭР [Текст] / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, Ю. А. Комаров, А. В. Шавлаков. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАНУ, 2010. – 200 с.
  6. Громов, Г. В. Результаты экспертной оценки стресс-тестов действующих энергоблоков АЭС Украины с учетом уроков аварии на АЭС «Фукусима-1» в Японии [Текст] / Г. В. Громов, А. М. Дыбач, О. В. Зеленый и др. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2012. – № 1 (53). – С. 3–9.
  7. Скалозубов, В. И. Комплекс методов переоценки безопасности атомной энергетики Украины с учетом уроков экологических катастроф в чернобыле и Фукусиме [Текст] / В. И. Скалозубов, Г. А. Оборский, И. Л. Козлов и др. – Одесса: Астопринт, 2013. – 244 с.
  8. Рекомендации по оценке характеристик смерча для объектов использования атомной энергии [Текст] / Руководства по безопасности РБ-022-01. – Госатомнадзор России, 2002.
  9. Васильченко, В. Н. Моделирование аварий на ядерных энергетических установках атомных электростанций [Текст] / В. Н. Васильченко, Е. З. Емельяненко, В. И. Скалозубов и др. – Одесса: Резон, 2002. – 466 с.
  10. Дополнительные материалы анализа безопасности Запорожской АЭС [Текст] / "Энергопроект", 1999.
  11. Скалозубов, В. И. Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах [Текст] / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, В. Н. Ващенко, С. С. Яровой. – Чернобыль: Ин-т проблем безпеки АЕС НАН України, 2012. – 280 с.

**Здійснено визначення комплексу полютантів та фактичні джерела забруднення атмосферного повітря м. Суми. Визначені рослини-індикатори відповідно до біоіндикаційного ряду чутливості деревних культур. Розраховано інтегральний показник асиметрії листової пластинки для ділянок з різним рівнем техногенного навантаження в умовах зміни промислової інфраструктури міста. Здійснено дослідження значень показника рН кори дерев, що відносяться за своїми властивостям до видів з бідною корою**

**Ключові слова: атмосферне повітря, промислова інфраструктура, забруднювачі, експрес-оцінка, біоіндикація, асиметрія, листя, кора**

**Проведено определение комплекса загрязнителей и фактических источников загрязнения атмосферного воздуха г. Сумы. Определены растения-индикаторы в соответствии с биоиндикационным рядом чувствительности древесных культур. Рассчитан интегральный показатель асимметрии листовой пластинки для участков с разным уровнем техногенной нагрузки в условиях изменения промышленной инфраструктуры города. Проведено исследование значений показателя рН коры деревьев, относящихся по своим свойствам к видам с бедной корой**

**Ключевые слова: атмосферный воздух, промышленная инфраструктура, загрязнители, экспресс-оценка, биоиндикация, ассиметрия, листья, кора**

УДК 574.52:573.58

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.43753

## ПРОВЕДЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ЕКСПРЕС- ОЦІНКИ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УМОВАХ ЗМІНИ ПРОМИСЛОВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ РЕГІОНУ

Д. Л. Пляцук

Асистент

Кафедра прикладної екології

Сумський державний університет

вул. Римського-Корсакова, 2,

м. Суми, Україна, 40007

E-mail: plyacuk@teko.sumy.ua

### 1. Вступ

На сьогодні все більшої актуальності набуває проблематика якісної експрес-оцінки рівня забруднен-

ня компонентів довкілля. Оцінювати якість навколишнього середовища, ступінь її сприятливості для людства необхідно, передусім, з метою: визначення стану природних ресурсів; розробки стратегії раціо-