

В. И. Скалозубов¹, В. В. Богодист²,
И. Л. Козлов³, Т. В. Габлая¹, В. Ю. Кочнева¹

¹ Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, г. Киев

² ОП Запорожская АЭС ГП НАЭК «Энергоатом»,
г. Энергодар Запорожской обл., Украина

³ Одесский национальный политехнический университет,
г. Одесса, Украина

Метод оценки критериев затопления промплощадки Запорожской АЭС при запроектных землетрясениях

Предложена гидродинамическая модель возможного затопления промплощадки Запорожской АЭС при запроектных землетрясениях и смерчах. 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 ЗАЭС при внешних экстремальных воздействиях.

Ключевые слова: гидродинамическая модель, затопление, землетрясение.

В. И. Скалозубов, В. В. Богодист, И. Л. Козлов, Т. В. Габлая, В. Ю. Кочнева

Метод оцінки критеріїв затоплення проммайданчика Запорізької АЕС у разі позапроектних землетрусів

Запропоновано гідродинамічну модель можливого затоплення проммайданчика Запорізької АЕС у разі позапроектних землетрусів та смерчів. На відміну від квазістационарного підходу стрес-тестів, у запропонованій моделі враховується динамічний характер процесів затоплення, а також безпосередній вплив зовнішніх екстремальних дій на Каховське водосховище. В результаті проведенного гідродинамічного моделювання визначено можливі умови та критерії затоплення проммайданчика ЗАЕС під час зовнішніх екстремальних впливів.

Ключові слова: гідродинамічна модель, затоплення, землетрус.

© В. И. Скалозубов, В. В. Богодист, И. Л. Козлов,
Т. В. Габлая, В. Ю. Кочнева, 2013

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-Daiichi).

Особо актуален этот вопрос для Запорожской АЭС (далее — ЗАЭС), расположенной на высоте 22 м вблизи Каховского водохранилища, которое является составной частью водохранилищ Днепровского каскада ГЭС (Киевская, Каневская, Кременчугская, Днепродзержинская, Днепровская ГЭС, рис. 1).

Первым выше Каховского водохранилища, на котором находится промплощадка ЗАЭС в Днепровском каскаде ГЭС, является Днепровское водохранилище (ДнепроГЭС), построенное еще в 1927—1932 гг. (гидротехнические сооружения восстановлены в послевоенный период) и расположенное на территории Днепровской и Запорожской областей. Его общая длина составляет 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 перечисленных выше 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 нормальном подпорном уровне (НПУ) составляет около 25,53 км³.

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 Днепровского 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).

В случае разрушения каскада плотин возможно при определенных условиях затопление Каховского водохранилища и прилегающих окрестностей (в том числе и промплощадки ЗАЭС). Детерминистские оценки событий, связанных с прорывом плотин Днепровского каскада (кроме Каховского водохранилища), 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 энергоблоку ЗАЭС. Основная ударная волна при прорыве ДнепроГЭС будет направлена на побережье п. Васильевка, расположенного восточнее промплощадки ЗАЭС (более 60 км).

2. Влиянию затопления могут быть подвержены плотина пруда-охладителя с комплексом сооружений системы охлаждения основного турбинного оборудования; брызгальные бассейны №№ 1, 2; подводный канал; блочные насосные станции №№ 1...6; сооружение продувки и канал подпитки пруда-охладителя. Потенциально уязвимо к превышению проектного уровня вод (более 18,0 м) на промплощадке ЗАЭС 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 общеблочной дизель-электростанции и др.).

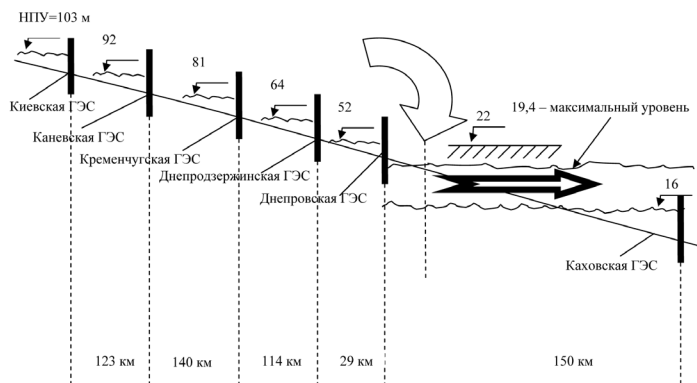


Рис. 1. Модель стресс-тестов возможного затопления пруда-охладителя ЗАЭС [1].



Рис. 2. Плотина Днепропольского водохранилища.

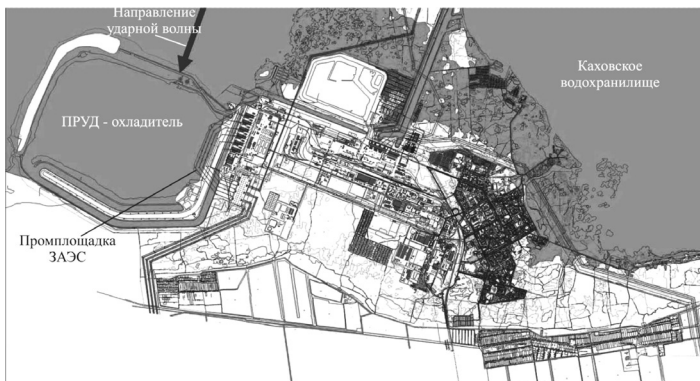


Рис. 3. Зоны возможного затопления пруда-охладителя и промплощадки ЗАЭС [3]

Основным ограничением оценки возможного затопления промплощадки ЗАЭС при разрушении плотин Днепропольского каскада в [3] является квазистатическая модель гидравлических процессов, не учитывающая существенно динамического характера как самого разрушения плотин, так и возможных внешних экстремальных возмущений (так называемые жесткие условия). Допущения об «однонаправленности» ударной волны от прорыва плотины также не вполне обоснованы: ударная волна будет распространяться по всему объему

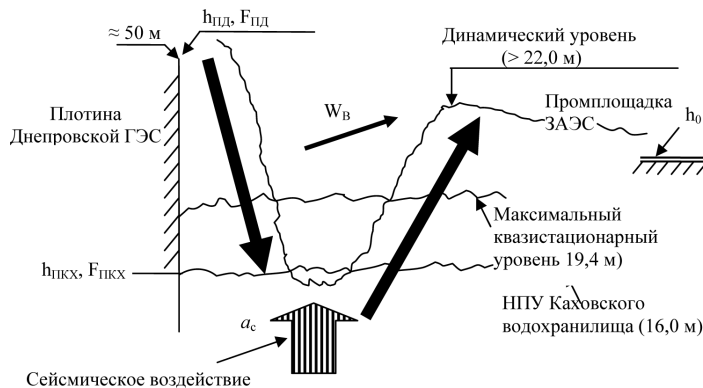


Рис. 4. Гидродинамическая модель затопления промплощадки ЗАЭС при запроектных землетрясениях с откликом ускорения a_c

водохранилища (в том числе и в районе промплощадки ЗАЭС). Возможное затопление Каховского водохранилища, как вторичного события (вызванного запроектным землетрясением), моделировалось в стресс-тестах при консервативном допущении, что происходит лавинообразное разрушение всех плотин Днепропольского 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:

- 1) максимальный дополнительный объем воды, поступающий в пруд-охладитель из Каховского водохранилища, составляет около 2,0 млн. м³, а уровень в пруде-охладителе до отметки 16,7 м повышается в течение приблизительно шести суток;
- 2) максимально возможная высота волны ветрового нагона равна 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, что «прямой риск затопления площадки ЗАЭС по причине прорыва/разрушения вследствие землетрясения отсутствует» [1].

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

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

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 будут 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 Запорожской АЭС 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.

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 под непосредственным воздействием этих внешних экстремальных событий на водный объем 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, диссипацией энергии на тепловые превращения консервативно пренебрегаются.

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

на стадии формирования ударной волны

$$G_0 = \mu F_{\text{ПД}} \rho \sqrt{2g\Delta H_0};$$

$$\rho F_{\text{ПД}} \frac{dh}{dt_1} = G_0 - G_{\text{уд}}(t_1);$$

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

$$h(t_1 = 0) = h_{\text{ПКХ}}; \quad \frac{dh}{dt_1}(t_1 = 0) = 0; \quad \frac{d^2 h}{dt_1^2}(t_1 = 0) = a_c;$$

на стадии распространения ударной волны

$$\frac{d(lhr)}{dt_2} = 0;$$

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

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

$$\frac{dr}{dt_2}(t_2 = 0) = \frac{G_{\text{уд}}(h = h_{\text{max}})}{\rho l(r = 0)h_{\text{max}}} = W_{\text{уд}_0};$$

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

Условие затопления промплощадки:

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

В приведенных формулах 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 свободного падения; $F_{\text{ПД}}$ — площадь проходного сечения через плотину Днепровского водохранилища; $\rho, \rho_{\text{В}}$ — плотность воды и ветра, соответственно; ΔH_0 — общий нивелирный перепад высот разрушенного Днепровского водохранилища; h — 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; $h_{\text{ПД}}$ — высота плотины над уровнем водохранилища; $h_{\text{ПКХ}}$ — уровень водохранилища.

Для области формирования ударной волны в качестве масштабного критерия времени целесообразно использовать продолжительность сейсмического воздействия Δt_c с откликом ускорения на грунте a_c . Тогда в критериальной форме гидродинамическая модель стадии формирования ударной волны будет иметь вид

$$\frac{dH}{dT_1} = A_1 \left[1 - \frac{G_{\text{уд}}(T_1)}{G_0} \right];$$

$$\frac{d}{dT_1} \left(H \frac{dH}{dT_1} \right) = A_2 - K_{\text{Н}} \left(\frac{dH}{dT_1} \right)^2;$$

$$H(T_1 = 0) = A_3;$$

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

где $A_1 = \frac{\mu \Delta t_c \sqrt{2g\Delta H_0}}{h_0}; \quad A_2 = \frac{\Delta t_c^2}{h_0^2} \left(\frac{G_0^2}{\rho^2 F_{\text{ПД}}^2} + \Delta H_0 + a_c h_{\text{ПД}} \right);$

$$A_3 = \frac{h_{\text{ПКХ}}}{h_0}; \quad A_4 = \frac{a_c \Delta t_c^2}{h_0}; \quad H = \frac{h}{h_0}; \quad T_1 = \frac{t_1}{\Delta t_c}.$$

Для стадии распространения ударной волны в качестве временного масштаба целесообразно использовать характерное время достижения волной промплощадки АЭС. Тогда в критериальной форме гидродинамическая модель

* Аналогичным недостатком обладает и принятая в стресс-тестах модель «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.

распространения ударной волны (при консервативном допущении, что скорость ураганного ветра значительно больше скорости распространения волны)

$$\frac{d(LHR)}{dT_2} = 0;$$

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

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

$$\frac{dH}{dT_2}(T_2 = 0) = 0;$$

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

где $R = \frac{r}{r_{\text{АЭС}}}$; $L = \frac{l}{l_{\text{max}}}$; $T_2 = \frac{t_2 W_{\text{уд}0}}{r_{\text{АЭС}}}$; $A_5 = \frac{\rho_B W_B^2}{\rho W_{\text{уд}0}^2}$.

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 получены консервативные условия незатопления промплощадки ЗАЭС ударной волной, вызванной землетрясением, которое сопровождается ураганным ветром:

$$K_1 = \frac{\mu \Delta t_c \sqrt{2g \Delta H_0}}{\lambda_r K_H r_{\text{АЭС}}} < 10^{-1};$$

$$K_2 = \frac{a_c \Delta t_c^2}{h_0} < 5 \cdot 10^2;$$

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

Выводы

1. Проведенные в отчетах по анализу безопасности и стресс-тестах оценки возможности затопления промплощадки Запорожской АЭС при запроектных землетрясениях недостаточны, так как не учитывают существенно гидродинамического характера 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 Запорожской АЭС при запроектных землетрясениях, сопровождаемых ураганным ветром.

Предложенный метод моделирования согласуется 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 использованной литературы

1. *Результаты* проведения стресс-тестов: Национальный отчет Украины / ГИЯРУ. — 2011.
2. *Правила* эксплуатации водохранилищ Днепровского каскада ГЭС / Укргидропроект. — 1981.
3. *Дополнительные материалы* анализа безопасности Запорожской АЭС // Харьковский институт «Энергопроект». — 1999.

References

1. *The results of the stress tests*: National report of Ukraine / GIYARU (SNRI). — 2011. (Rus)
2. *The rules of operation of reservoirs of Dnipro cascade*/ Ukrhydroproject. — 1981. (Rus)
3. *Additional materials of Zaporizhzhya NPP safety analysis*/ Kharkivskiy Institute “Energoproject”. — 1999. (Rus)

Получено 30.07.2013.