

## **ОЦЕНКА РИСКОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ И ТЕХНОГЕННЫХ ПАВОДКОВ НА ОБЪЕКТЫ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ**

Румянцев А.Б., Беликов В.В.  
Институт водных проблем РАН, г. Москва  
iwp.alex.rum@gmail.com

Целью настоящей работы являлся расчет и анализ рисков для сооружений Балаковской АЭС от аварий на гидротехнических сооружениях Жигулевской и Саратовской ГЭС, вызывающих волну прорыва, для принятия последующих решений по предотвращению негативных последствий для Балаковской АЭС. Расчеты воздействия экстремальных гидрометеорологических явлений на сооружения АЭС стали проводиться после аварии на АЭС Фукусима (Япония).

Разработана компьютерная гидродинамическая модель Куйбышевского, Саратовского и части Волгоградского водохранилищ (до г. Вольск), основанная на трехмерной цифровой модели рельефа (ЦМР) всего участка с учетом чертежей сооружений гидроузлов и АЭС и численном решении двумерных уравнений Сен-Венана на области моделирования. Выполнены расчеты волны прорыва грунтовой плотины Куйбышевского гидроузла в условиях половодья обеспеченностью 0.01% (расход 78300 м<sup>3</sup>/с) и с учетом воздействий ветра обеспеченностью 1% (скорость 36.5 м/с) разных направлений с детализацией в районе Балаковской АЭС и Саратовской ГЭС.

В такой постановке расчеты проводились впервые. Выполненные до этого различными организациями расчеты параметров волны прорыва Куйбышевского гидроузла проводились либо на фоне среднемноголетнего расхода р. Волги и уровня воды у Саратовского гидроузла, равного НПУ=28.0 м, либо при наложении волны прорыва на половодье обеспеченностью 0.01%, но в обоих случаях без учета ветрового воздействия. Методика расчетов разрабатывалась с учетом поставленной цели и особенностей рассматриваемого объекта. Для расчета вероятных воздействий от прохождения волны прорыва были разработаны возможные сценарии гидродинамической аварии, определены вероятности этих сценариев, рассчитаны параметры волны прорыва (гидрографы излива, максимальные подъемы уровней воды в районе АЭС, глубины затопления, скорости течения), отрисованы зоны затопления на топографических кар-

тах и космических снимках. При моделировании широко применялись ГИС-технологии.

**Построение компьютерных моделей Куйбышевского и Саратовского водохранилищ с детализацией в районе Балаковской АЭС.** При построении компьютерной модели водохранилищ производилось формирование цифрового рельефа. Электронная топографическая карта совмещалась с векторизованными лоцманскими картами Куйбышевского, Саратовского и части Волгоградского водохранилищ, а так же чертежами гидротехнических сооружений. Формировалась цифровая модель рельефа (ЦМР) в виде трехмерного поля точек с координатами  $x, y, z$  (рис.1). После этого отметки рельефа интерполировались в центры ячеек треугольно-четырёхугольной расчетной сетки при помощи специальной программы по оригинальной методике [1].

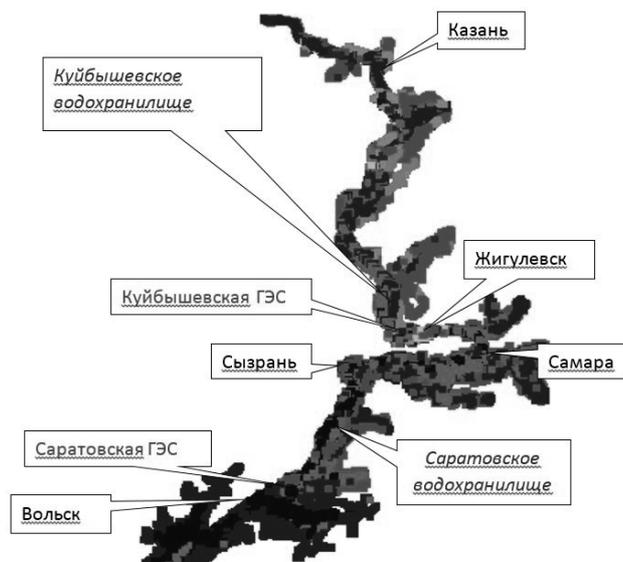


Рис. 1 – Цифровая модель рельефа Куйбышевского, Саратовского и части Волгоградского водохранилищ с детализацией в районе Балаковской АЭС

При построении двумерной модели применялись гибридные треугольно-четырёхугольные сетки нерегулярной структуры, адаптированные к геометрическим и батиметрическим особенностям рассматриваемого объекта. В старом русле реки Волги в Куйбышевском и Саратовском водохранилищах, а также на плотинах Жигулевского и Саратовского гидроузлов и ограждающей дамбе водо-

ема-охладителя Балаковской АЭС строилась четырехугольная сетка, а на остальной области – треугольная. В итоге была построена сетка для глобальной модели, содержащая около 69 тыс. ячеек с длинами сторон от 100м до 1500 м, общей протяженностью по руслу Волги около 700 км, а так же сетка для локальной модели длиной около 100 км с ячейками от 20м до 500 м, фрагмент которой приведен на рис. 2.

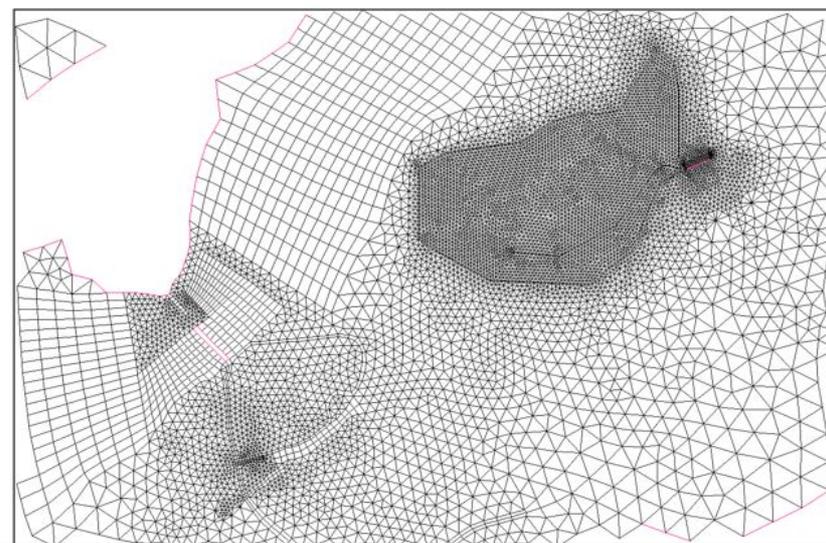


Рис. 2 – Фрагмент расчетной сетки в районе Саратовского гидроузла и водоема-охладителя Балаковской АЭС

Важным этапом при построении компьютерной гидравлической модели объекта является калибровка модели, т.е. настройка на данный объект путем подбора входящих в модель параметров таким образом, чтобы получить согласование с имеющимися натурными данными. В работе использовались имеющиеся гидрологические данные по расходам и уровням воды на водомерных постах Самара, Сызрань, Вольск и Саратов в половодья 1979, 1981 и 1986 годов, а также кривые связи расходов и уровней в нижних бьефах Жигулевского и Саратовского гидроузлов.

Анализ соответствующих данных показал, что при прохождении каждого из этих половодий существовал период времени, равный примерно 7 суткам, в течение которого расходы через гидроузел оставались практически постоянными, а уровни на водомер-

ных постах изменялись незначительно. Это позволило провести калибровку при постоянных расходах воды 38000 м<sup>3</sup>/с и 27300 м<sup>3</sup>/с, значения которых задавались на входной границе расчетной области течения. На выходной границе расчетной области в створе г. Вольск принимались абсолютные уровни воды.

**Выполнение расчетов.** Расчеты проводились по модели STREAM\_2D [2], построенной на основе двумерных уравнений Сен-Венана с использованием трехмерной батиметрии водохранилищ и кривых пропускной способности Куйбышевского и Саратовского гидроузлов, причем для последнего кривая была доопределена до величины расхода 100 тыс. куб. м/с (с учетом работы Балаковского шлюза). Для расчета развития прорана в грунтовой плотине Куйбышевского гидроузла применялась хорошо апробированная методика А.М. Прудовского [3], по которой ранее выполнены расчеты волны прорыва для Ивановского, Угличского, Рыбинского, Камского, Новосибирского, Цимлянского, Краснодарского и еще более 50 гидроузлов России.

Расчеты ветровых нагонов проводились также по программе STREAM\_2D путем включения в расчеты ветровых напряжений на свободной поверхности воды при заданной 1% скорости ветра 36.5 м/с различных румбов. При этом предполагалось, что скорость ветра начинает нарастать одновременно с началом развития прорана в створе Куйбышевской ГЭС.

Параметры ветровых волн и их воздействие на гидротехнические сооружения Балаковской АЭС рассчитывались в соответствии с нормативной документацией. Параметры волнения рассчитывались с учетом затопления от волны прорыва и ветровых нагонов.

В результате расчетов определялись максимальные уровни воды у сооружений Балаковской АЭС при различных сценариях развития гидродинамической аварии с учетом воздействия ветров различных направлений, а также максимальные глубины затопления (см. рис. 3) и скорости течения у ограждающей дамбы №1 водоемоохладителя, волновое воздействие на дамбу и другие сооружения АЭС.

Расчеты показали сложную динамику взаимодействия паводкового потока, волны прорыва, ветровых нагонов и ветровых волн, при различных сочетаниях которых формируются разные уровни водной поверхности и параметры волнения у сооружений АЭС.

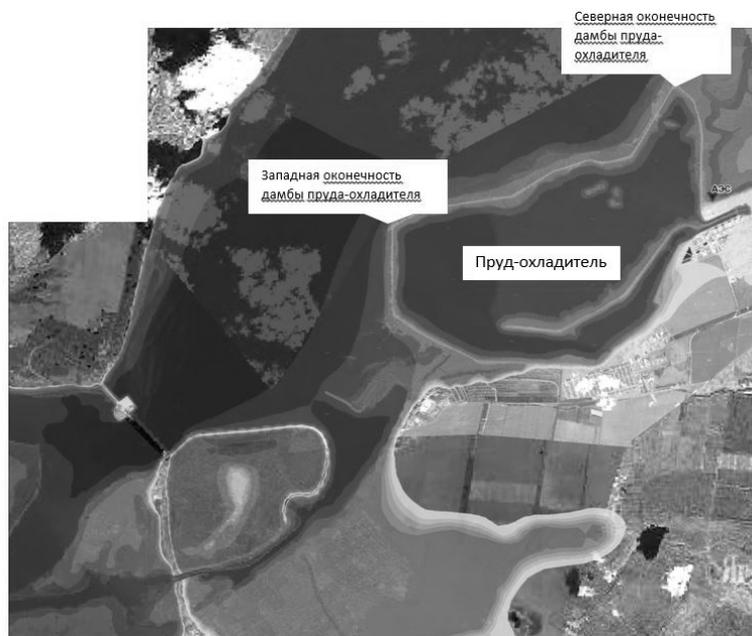


Рис. 3 – Максимальные глубины затопления у ограждающей дамбы № 1 водоема-охладителя

**Оценка вероятностей и рисков рассматриваемых сценариев.** Повторяемости половодья 1 раз в 10000 лет и ветра – 1 раз в 100 лет заданы по условиям расчетов. Поскольку наибольшие уровни воды у сооружений Балаковской АЭС возникают при ветрах Юго-Западного (годовая повторяемость 18%), Северного (16%) и Северо-Западного (13%) направлений, постольку суммарную вероятность 1% ветров именно этих направлений можно оценить величиной  $4.7 \cdot 10^{-3}$  в год. Согласно СНиП 33-01-2003 «ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ» допускаемое значение вероятности возникновения аварий на напорных гидротехнических сооружениях I класса (Куйбышевский г/у) равно  $5 \cdot 10^{-5}$ . Эти три случайных события можно считать независимыми, поскольку Куйбышевский гидроузел пропускает половодье 0.01% при ФПУ в расчетном режиме. Исходя из приведенных значений вероятностей, можно сделать следующие оценки вероятности рассматриваемых сценариев:

- Вероятность наложения 1% ветра опасных для Балаковской АЭС румбов на 0.01% половодье равна  $4.7 \cdot 10^{-7}$ . Повторяемость та-

кого события – один раз в два миллиона лет. При этом площадка Балаковской АЭС не затопливается, но может произойти перелив и частичное разрушение ограждающей дамбы водоема-охладителя;

- Вероятность наложения волны прорыва Куйбышевского гидроузла на 0.01% половодье ничтожно мала и равна  $5 \cdot 10^{-9}$ . При этом площадка Балаковской АЭС не затопливается, но произойдет разрушение напорного фронта Саратовского гидроузла из-за перелива через гребень грунтовой плотины;

- Вероятность совпадения во времени трех экстремальных событий (половодья 0.01%, ветра 1% опасных румбов и волны прорыва Куйбышевского г/у) пренебрежимо мала и равна  $2.35 \cdot 10^{-11}$ . При этом площадка Балаковской АЭС может подвергнуться подтоплению на глубину не более 0.2 м.

По результатам этих расчетов построен обобщающий график повторяемости высоких уровней воды в районе Балаковской АЭС (рис. 4), на котором нижняя кривая соответствует осредненным уровням воды с учетом ветрового нагона, но без учета волнения, а верхняя кривая дает отметки гребней экстремальных волн (каждая сотая волна).

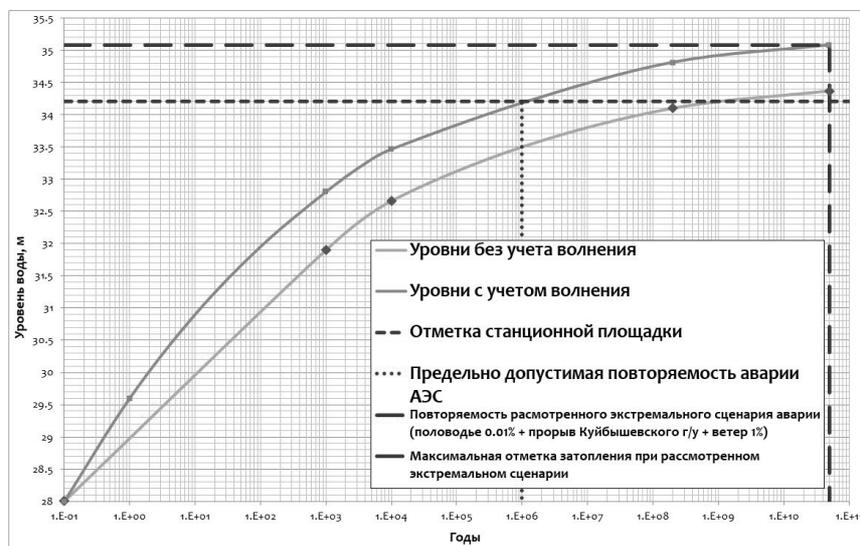


Рис. 4 – График повторяемости высоких уровней воды в районе Балаковской АЭС

Из графика (рис. 4) видно, что при вероятности критического наложения экстремальных событий с частотой реализаций  $10^{-6}$  площадка АЭС расположена выше гребней волн. Этим обосновывается, согласно п.6.10 НП-064-05, отказ от проведения мероприятий по исключению повреждений при внешних воздействиях зданий и сооружений, важных для безопасности.

### Литература

1. *Беликов В.В., Иванов В.Д., Канторович В.К.* и др. Несибсоновская интерполяция – новый метод интерполяции значений функции на произвольной системе точек. //Журнал вычислительной математики и математической физики. 37, №1, 1997.
2. *Беликов В.В., Кочетков В.В.* Программный комплекс STREAM\_2D для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014612181. М., 2014.
3. *Прудовский А.М.* Образование прорана при прорыве земляной плотины // В сб.: Безопасность энергетических сооружений, вып. 2. -М.: АО "НИИЭС". 1998. С. 67-79.

## ГИДРОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ГЕОГРАФИЯ РИСКОВ ОПАСНЫХ НАВОДНЕНИЙ И МАЛОВОДИЙ НА РЕКАХ РОССИИ<sup>2</sup>

Семёнов В.А.  
ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», г. Обнинск,  
semven@meteo.ru

Для современных изменений климата на территории России характерно увеличение его экстремальности, региональными гидрометеорологическими последствиями которой являются изменения рисков повторяемости опасных наводнений. Гидрологической основой наиболее распространённых паводочных и паводочных наводнений являются максимальные расходы воды рек, устанавливаемые по результатам сетевых наблюдений Росгидромета. Кроме того изменения климата обуславливают увеличение повторяемости

---

<sup>2</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке Русского географического общества и Российского фонда фундаментальных исследований (проект №13-05-41172).