

УДК 621.039.534.22

## АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И РАБОТЫ ПРУДА-ОХЛАДИТЕЛЯ НА ПРИМЕРЕ ХМЕЛЬНИЦКОЙ АЭС

А.П. Швец<sup>1</sup>, С.Т. Мирошниченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ДП НАЭК «Энергоатом» ОП Хмельницкая АЭС

<sup>2</sup>Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Исследовались фактическая работа пруда-охладителя Хмельницкой АЭС и теоретическая возможность повышения коэффициента использования установленных площадей для понижения показателей средней температуры сбросных технических вод охлаждения по площади пруда-охладителя Хмельницкой АЭС перед подачей их на водозабор. Также исследовалась вероятность внедрения мер, направленных на понижение средней температуры вод пруда-охладителя, которые должны повысить коэффициент охлаждения вод без расширения установленных площадей. Разрабатываемые меры могут послужить моделью при разработке новых прототипов.

### Введение

В атомной энергетике вопросам отвода излишков тепла с энергетического оборудования уделяется особое место. Нарушение процесса теплоотвода угрожает безопасной эксплуатации энергоблоков и исключает возможность введения дополнительных мощностей или приводит к снижению уже установленных. Пруды-охладители, как находящиеся в эксплуатации, так и разрабатываемые, должны быть задействованы не только по расчетной площади контакта с конечным поглотителем, но и с учетом всех не учитываемых ранее вариаций и технических мер, таких как технические комплексы предохлаждения или меры, направленные на повышение коэффициента теплоотдачи. Основная часть прудов-охладителей эксплуатируется, используя лишь отношение эффективной рабочей площади к отводимой тепловой энергии, без учета принципов расчета охлаждения воды в общем объеме, за счет внедрения активных систем доохлаждения и пассивных систем циркуляции. Данную задачу способны решить технические меры и организационные мероприятия, внедряемые в системы прудов охладителей, с помощью которых отводимая тепловая энергия будет иметь больший числовой показатель, а объем технических вод будет иметь запас до гранично-регламентируемых величин, установленных для повышения безопасной эксплуатации.

### Постановка цели и задач научного исследования

Целью исследования является анализ эффективности работы прудов-охладителей. Анализ проводится на прототипе водохранилища-охладителя Хмельницкой АЭС, на проектной площади которого эксплуатируются два атомных энергоблока. Проведение исследований по данной тематике основывается на потребности проведения точного анализа для улучшения работы пруда-охладителя Хмельницкой АЭС, тепловая нагрузка которого увеличится в связи с планируемым введением новых мощностей в виде

двух атомных энергоблоков, по 1000 МВт электрических каждый. Подобные исследования проводились ранее и описаны в работах [1- 4], но они имеют данные, которые расходятся между собой. В данной работе исследуется эффективная площадь теплообмена по зеркалу водохранилища, движение и перемещение масс воды в зависимости от изменения климатической нагрузки и конструкционных показателей, возможности внедрения технических решений для улучшения процесса теплообмена и показателей теплоотдачи.

### **Анализ проектных, исходных и предполагаемых данных**

Исходной точкой начала этапов моделирования пруда-охладителя Хмельницкой АЭС стало проведение экспериментов и исследований его технических показателей и фактических характеристик. Подобные исследования проводились открытым акционерным обществом (далее - ОАО) «Укрводопроект», ОАО «ЛьвовОРГРЭС», Украинским научно-исследовательским институтом экологических проблем (далее – УкрНИИЭП), ОАО "Киевский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Энергопроект" и ведущими специалистами Хмельницкой АЭС. Целью данных исследований было выявление объемных, температурных и эксплуатационных показателей, а также показатели взаимодействия с окружающей средой и запасы водных ресурсов для повышения показателей безопасной эксплуатации и возможности внедрения новых мощностей на промышленной площадке.

Были проанализированы проектные и эксплуатационные данные, поставлен ряд фактических и натуральных экспериментов, по которым были получены исходные данные для расчета. В компоновку разработки были взяты такие данные:

- максимальная температура охлаждающих и сбросных вод для жаркого времени года на всасе блочной насосной станции (далее – БНС), сбросном канале и пруде-охладителе;
- максимальная температура окружающей среды для жаркого времени года;
- показатели глубины пруда-охладителя;
- площадь пруда-охладителя;
- показатели перемещения водных масс по площади пруда-охладителя, в зависимости от ветровой нагрузки.

Показатели максимальных температур воды на всасе БНС и температуры окружающей среды для жаркого времени года по данным инженерно-вычислительной системы Хмельницкой АЭС за 2012 год представлены в таблице, где:

- $t_A^{\circ C}$  – максимальный показатель воды на всасе БНС;
- $t_W^{\circ C}$  – максимальный показатель температуры окружающей среды.

Регистрация глубин пруда-охладителя выявила наличие относительно неизменного показателя глубины, который колеблется в диапазоне 2...7 м глубины и занимает около 55 % территории дна. Остальные 45 % занимают глубины 7...22 м, что наглядно показано на рис.<sup>о1</sup>.

На рис.<sup>о1</sup> присутствуют следующие обозначения: 1 – линия сбросного «горячего» канала, 2 – линия подводящего «холодного» канала, 193, 195, 198, 203 – показатели глубин дна пруда-охладителя Хмельницкой АЭС над уровнем Балтийского моря, из которых 198 – урез воды при уровне максимального осушения, 203 – урез воды при номинальном подпорном уровне.

Т а б л и ц а 1

## Температурные показатели для жаркого времени года

Дата	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь	
	tA°C	tW°C	tA°C	tW°C	tA°C	tW°C	tA°C	tW°C	tA°C	tW°C	tA°C	tW°C
1	34,4	26,2	25,1	25,7	33,4	28,6	26,8	26,7	29	24,8	16,9	20,8
2	29,1	25,2	16,7	24,7	33,3	28	31,1	26,6	28,2	25,7	24,4	21
3	28,3	26,7	19,6	24,7	35,1	29,1	35,5	27,7	27,3	25,8	24,2	21,2
4	30,1	27,9	24,8	24,9	33,5	28,6	31,7	29,3	25	26,8	18,6	21,7
5	21,5	27,3	20,4	23,8	34,3	29,9	31,7	28,9	26,6	27,8	13,8	20,8
6	25,4	26,7	20,5	23,7	34,4	30,5*	36,8	28,6	19,7	26,9	21	21,7
7	25,2	27	25,2	26,7	33,7	30,9*	29,3	28,4	18	25,9	16	20,6
8	11,7	24,7	26,6	26,1	34,2	32,3*	27,4	28,4	18,6	32,8*	9,8	19,3
9	17,2	23,5	27,3	26,1	32,2	31,8*	25,1	27,9	18,1	35,1*	13	18,7
10	24,1	26,9	25,8	27,5	29,5	31,3*	22,7	27,1	22,9	30,4*	9,8	18,4
11	26,8	26,7	30	26,7	30	30	19,6	27,3	26,7	24,2	10,8	17,7
12	28,6	27,3	24,4	27,1	27,2	29,4	13,5	26,4	27,4	24	9,6	17,6
13	11	24,9	25,1	27,2	25,7	29,2	14,1	24,7	26,3	23,9	12,6	16,7
14	15,1	23,1	21,8	27	29,6	28,9	17,4	24,2	21,6	23,1	11,9	16,2
15	22,7	22,9	18,4	26,9	24,7	28,9	17,8	23,8	15,1	22,7	13,6	16,3
16	25,2	23,6	23,4	27,3	23	28	20,3	22,7	19,9	25	15,9	16,6
17	17,1	23,5	31,8	28,7	21,4	27,8	23,2	23,3	22,3	23,9	9,6	16,5
18	15,5	22,9	33,3	28,9	20,6	27,1	23,7	24	25,4	24,8	15,8	16,8
19	19,7	22,5	33,3	29,9	27,4	26,4	23,8	24	26,9	24,9	19,4	15,8
20	30,7	22,9	30,6	28,6	25,3	26,5	30,4	24	16,8	23,9	18,3	15,9
21	32,1	25	33,5	30,3	16,4	25,6	23	23,7	10,1	21,4	18	16,2
22	28,5	24,7	30,4	29,6	15,7	24,4	30,3	24,5	11,2	21,5	11	16,9
23	26,4	25,1	24,2	29,5	23,9	24,2	26,1	24,9	15,8	22,8	10	15,9
24	22,7	24,8	26,5	30,4	28,6	24,2	31,1	25,6	18,7	22,2	7,4	15,4
25	20	23,9	24,9	29,8	32,5	24	30,4	26,4	21,2	22,1	7,2	14,9
26	19,9	23,9	20,3	27,9	34,5	25,3	32,4	25,6	25,3	22,2	7,8	16,4
27	22,5	24,1	18,2	27,7	34,1	26,1	20,8	25,7	28,9	22,2	12,3	14,2
28	22,9	21,7	20	26,6	35,7	27,9	17,6	24,2	19,9	21,8	2,2	15,3
29	26,5	28,4	25,2	27	36,1	26,9	19,9	23,6	23,4	21,7	1	13,5
30	19,6	26,6	28,5	28,3	30,9	28,2	20,8	24,3	18,4	22,4	3,1	12,7
31	21,1	25,7			24,6	27,5	25,1	24,7			7	14,5

Показатели площади водного зеркала пруда-охладителя, согласно проектной документации (далее – ПД) и окончательному отчету по анализу безопасности (далее – ООАБ), составляют 20 км<sup>2</sup>, но эта площадь не используется эффективно из-за специфических показателей перемещения водных масс «горячего водосброса».

В связи с расположением и конструкцией пруда-охладителя Хмельницкой АЭС, а также показателями перемещения воздушных масс на промышленной площадке электростанции возникает явление «присосов» недоохлажденной воды. Данный эффект проявляется эффектом «прибивания» горячей воды потоками ветровых масс воздуха на всас блочных насосных станций (далее – БНС). Усредненный показатель ветровой нагрузки составляет: 37 % – ветер северного направления, 21 % – ветер северо-западного направления, 18 % – ветер юго-западного направления. Остальные 24 % ветровой нагрузки составляют воздушные массы южных и восточных направлений. Данные пока-

затели вносят негативный эффект, прибывая «горячие» массы воды на всас БНС, который расположен на северо-востоке пруда-охладителя. Стоит отметить, что одно из побочных явлений - показатель глубин, по которым движется водный поток, который составляет 1...5 м глубины, что уменьшает транспортное время охлаждения, тем самым не позволяя доохладиться водному потоку, минуя зоны «больших» глубин (7...20 м), попадая на всас БНС. Зоны перемещения «горячих» вод сбросного канала под влиянием факторов ветровых потоков детально представлены на рис.°2, который также можно сравнить с показателем глубин, представленным на рис.°1.

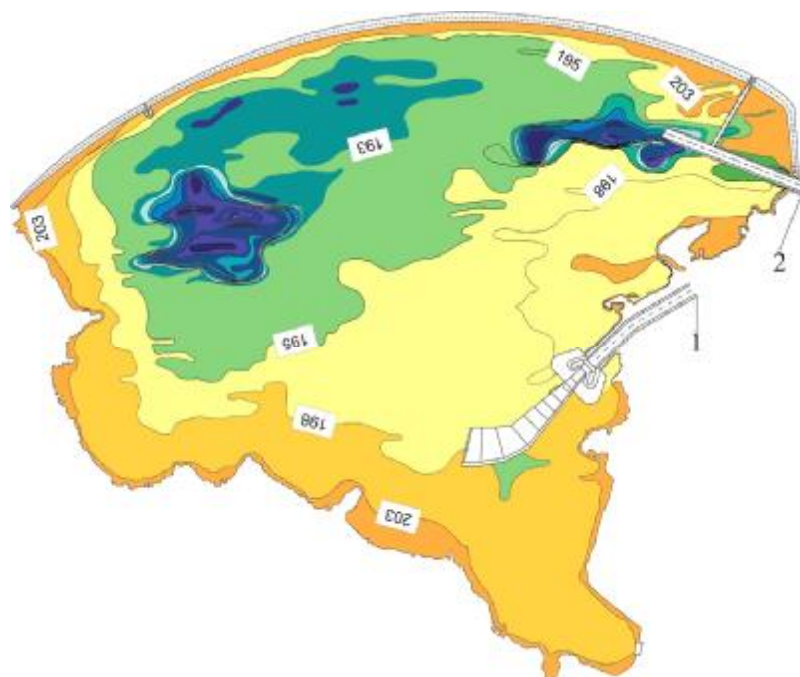


Рис. 1. Показатель основного распределения глубин по площади

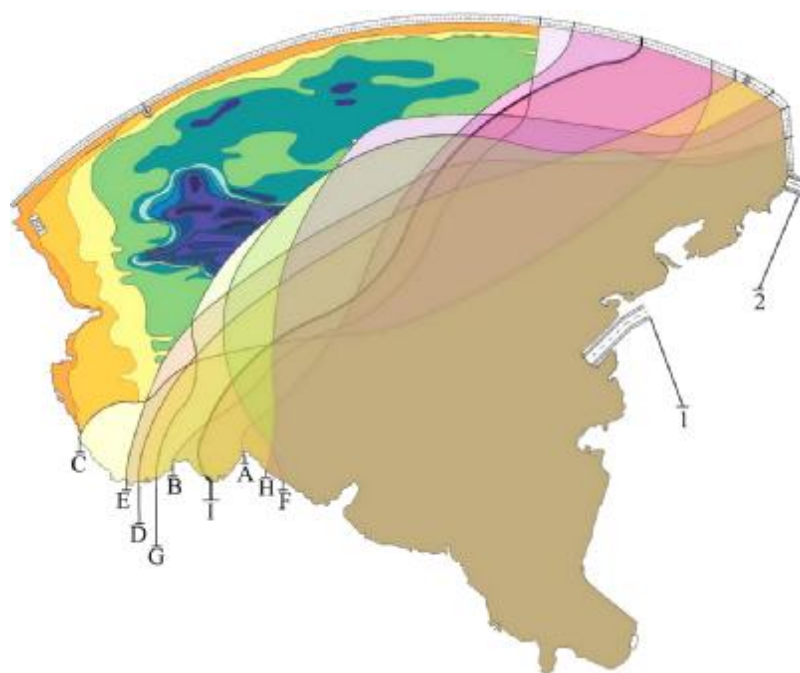


Рис. 2. Зоны перемещения от влияния ветра

На рис. 2 присутствуют следующие обозначения: 1 – линия сбросного «горячего» канала, 2 – линия подводящего «холодного» канала, А – граница перемещения воды под действием ветра западного направления, В – граница перемещения воды под действием ветра северо-западного направления, С – граница перемещения воды под действием ветра северного направления, D – граница перемещения воды под действием ветра северо-восточного направления, Е – граница перемещения воды под действием ветра восточного направления, F – граница перемещения воды под действием ветра юго-восточного направления, G – граница перемещения воды под действием ветра южного направления, H – граница перемещения воды под действием ветра юго-западного направления, I – усредненная граница используемой площади пруда охладителя.

### **Методы решения и расчет технических мер повышения эффективности работы пруда-охладителя Хмельницкой АЭС**

Для решения данной проблемы разработаны технические средства и меры, которые позволят снизить среднюю температуру пруда-охладителя в жаркое время года и эксплуатировать максимальные мощности, обоснованные в проекте.

Первым методом решения являются конструирование и постройка водоразделительной дамбы, расчетная длина которой составляет до 3500 м, ширина 15...20 м, выступ до двух метров над уровнем воды с учетом максимально-форсированного уровня (далее – МФУ), ширина сбросной горловины концевого створа 500 м. Данные характеристики гидротехнической конструкции позволяют производить заброс потока в зоны пруда-охладителя с большими глубинами и содержанием «холодных» вод. Перенаправленный «горячий» поток, смешиваясь с «холодными» массами воды и получая большой запас по транспортному времени, будет охлаждаться более максимально. Запас «холодных» вод в дальних зонах пруда-охладителя обусловлен большими глубинами и естественным охлаждением не только от атмосферы, но и от грунтов, находящихся на глубоком дне, которое, в свою очередь, является составной частью конечного поглотителя. К конечному поглотителю подводные грунты можно отнести из принципа природного температурного содержания, так как под всей поверхностью земли, вне зоны промерзания грунтов, температура колеблется в диапазоне 15...19 °С на протяжении всего года, вплоть до глубины 30 м, и, согласно принципам теплопроводности и природного теплообмена в горных породах, стремится к константе путем рассеивания полученной температуры в пластах породы. Это позволит вести учет снижения средней температуры путем охлаждения вод от донных площадей и дальнейшим смешиванием их с «горячими» потоками.

Вторым из методов решения проявившихся проблем в превышении показателей температуры пруда-охладителя Хмельницкой АЭС является метод предохлаждения сбрасываемых «горячих» вод. Для решения данной задачи актуальным является внедрение комплекса многоуровневых брызгальных систем охлаждения на площади зеркала пруда-охладителя в районе сопрягающего устройства отводящего канала. Такое размещение обусловлено несколькими факторами, такими как:

- наличие свободных и технически не занятых площадей для места установки;
- прямое попадание охлаждаемой воды в места смешения;
- целесообразность размещения по стороне доступа и эффективности использования охлаждаемой среды из-за максимальной температуры в точке сброса;
- постоянное и интенсивное перемещение воздушных масс, необходимых для охлаждения и теплообмена.

Технические характеристики брызгальных комплексов выбраны таким образом, чтобы охлаждаемая среда претерпевала снижение температуры в диапазоне 3...7 °С от начальной ее температуры. Спроектированная система состоит из насосной станции, соединительно-подающих трубопроводов, трубопровода рециркуляции и разгрузки объемного напряжения и полей брызгальных кластеров секционного типа. Комплекс брызгальной системы разбит на три подсистемы, каждая из которых рассчитана на расход от 70000 м<sup>3</sup>/ч (19,444 м<sup>3</sup>/с), который распределяется на двухъярусные разбрызгивающие системы сопел с «Х» (икс-образной) направленностью оси распыления радиусом действия 6...6,5 м и высотой распыляющего столба до 9 м. Нижняя конструкционная образующая имеет запас по высоте не менее трех метров над стационарным уровнем зеркала пруда-охладителя, что обеспечивает защиту от паводков и перемерзания трубопроводов в переходные сезоны, а также увеличивает высоту спадания охлаждаемого потока. Наглядное представление части конструкции брызгальной секции приведено на рис. °3.

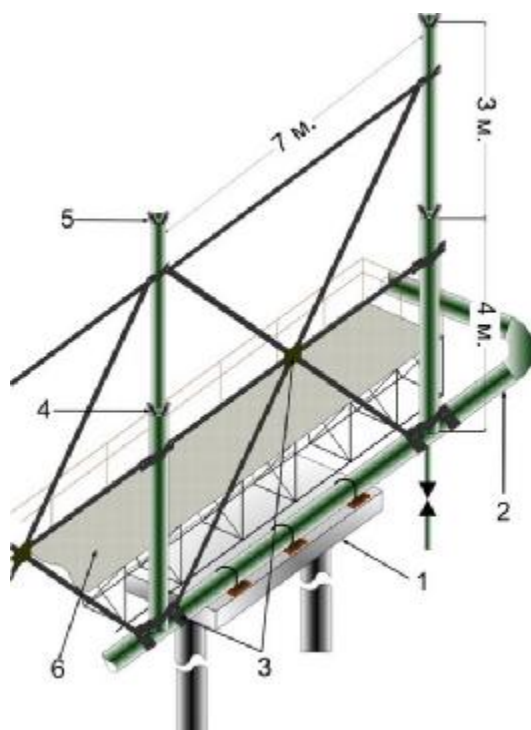


Рис. 3. Вид участка разбрызгивающих устройств

Для Хмельницкой АЭС рассчитана гряда брызгальных устройств с общим расходом охлаждаемой воды, равным расходу одного энергоблока, который работает на номинальных параметрах, для чего в конструкции поля брызгального комплекса предусмотрено 12 кластеров, в каждом из которых имеется по 4 секции с 92 разбрызгивающими соплами каждая. Водозабор на охлаждение размещен в акватории сопряжения со сбросным каналом, что обусловлено температурой сбрасываемой воды и ее доступностью. Температурный показатель ее составляет 42,2...44,5 °С для двух одновременно работающих энергоблоков и 47,5...49,4 °С с учетом двух энергоблоков, которые планируется ввести в эксплуатацию. Размещение секций брызгального комплекса рассчитано в акватории горячего сброса, на расстоянии 200 м от места сопряжения с «горячим» каналом», с «горячей» стороны разделительной дамбы, где происходит смешивание горячего водосброса, притока холодных вод и вод водохранилища, где происходит максимальное температурное

«напряжение» и нет влияния влаги от испарения на конструкции и сооружения атомной станции и открытого распредустройства.

На рис. °3 следующие обозначения: 1 – фундаментная опора, 2 – раздающий коллектор, 3 – фиксирующие опоры коллектора, 4 – разбрызгивающие устройства нижнего яруса, 5 – разбрызгивающие устройства верхнего яруса, 6 – площадка обслуживания.

Результатом внедрения данных технических мер и решений стало теоретически расчетное снижение средней температуры пруда-охладителя. После внедрения комплекса многоуровневых брызгальных систем охлаждения достигнутое снижение температуры составило диапазон 1,18...1,25 °С. Внедрение водоразделительной дамбы позволило снизить температуру пруда-охладителя в диапазоне 2,21...2,84 °С. Среднее значение снижения температуры составляет 3,39...4,09 °С.

## Выводы

Расчет поставленной задачи и ее детерминирование показали положительный теоретический результат от внедрения предлагаемых технических мер, направленных на коррекцию температурного режима пруда-охладителя Хмельницкой АЭС. Стоит отметить, что данная работа направлена как на выявление проблемы, так и на взаимосвязи комплексного решения в вопросе отвода излишков вырабатываемого тепла и безопасной эксплуатации. Исследование является вторым этапом в ряде экспериментов, по методам усовершенствования прудов-охладителей, предприятий энергетического комплекса и составляющей частью разрабатываемой диссертации на тему «Повышение эффективности и надежности работы прудов-охладителей Хмельницкой АЭС», где также изложены взаимосвязи, актуальность и результаты. Результаты работы на данном прототипе позволят выработать концепцию и методологию конструирования и постройки охлаждающих систем АЭС, связанных с конечным поглотителем, а также разработать методику выбора конструкции больших замкнутых систем охлаждения.

## АНАЛІЗ ТЕПЛОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ І РОБОТИ ВОДОЙМИЩА-ОХОЛОДЖУВАЧА НА ПРИКЛАДІ ХМЕЛЬНИЦЬКОЇ АЕС

**О.П. Швець, С.Т. Мирошніченко**

Досліджувалась фактична робота водоймища-охолоджувача Хмельницької АЕС і теоретична можливість підвищення коефіцієнта використання визначених площ для зниження показників середньої температури скидних технічних вод охолодження по площі водоймища-охолоджувача Хмельницької АЕС перед подачею їх на вододбір. Також досліджувалась імовірність введення додаткових засобів, направлених на зниження середньої температури вод водоймища-охолоджувача, котрі мають підвищити коефіцієнт охолодження без розширення визначеної площі. Розроблені засоби можуть використовуватись як модель при розробці нових прототипів.

## ANALYSIS of THERMAL EFFICIENCY and COLLING POUND OPERATION in IMITATION of KHMELNITSKY NPP

**A. Shvets, S. Miroshnichenko**

The actual work of the cooling pond of the Khmelnsky NPP and theoretical possibility of the use factor increasing for the set areas has been studied for the lowering of mean temperature indexes of waste waters to the whole cooling pond area of Khmelnsky NPP before their transport on the water inlet. It was researched the probability of additional adoption of new technologies directed on the cooling pond waters mean temperature decrease that would resulted in the cooling factor increasing without the set area expansion. The developed measures can be as the model while designing the new prototypes.

## Список использованных источников

1. Разработка математической модели водохранилища-охладителя ХАЭС для прогнозирования гидротермического режима в условиях работы энергоблоков № 1 - 4: Заключительный отчет по теме № 1.9-801 (х/д № 1.9-801 от 20.02.07) / Украинский научно-исследовательский институт экологических проблем (УкрНИИЭП); рук. Е.В. Еременко; исполн. Л.И. Лавриненко [и др.]. - Х., 2007. - 42 с. - № 3470. - Инв. №°1/2782.

2. Разработка математической модели водохранилища-охладителя ХАЭС для прогнозирования гидротермического режима в условиях работы энергоблоков № 1 - 4: Заключительный отчет по теме № 1.9-801 (х/д № 1.9-801 от 20.02.07) ДОПОЛНЕНИЕ № 1 / Украинский научно-исследовательский институт экологических проблем (УкрНИИЭП); рук. Е.В. Еременко; исполн. Л.И. Лавриненко [и др.]. – Х., 2008. – 19 с. – № 3476. – Инв. №°1/2787.

3. Разработка математической модели гидротермического режима ХАЭС в условиях ее работы с 1 - 4 энергоблоками, компьютерные программы для расчета течений и распределения температур в плане водохранилища-охладителя ЭТАП 1: Заключительный отчет по теме № 1.9-801 (х/д № 1.9-801 от 20.02.07) / Украинский научно-исследовательский институт экологических проблем (УкрНИИЭП); рук. Е.В. Еременко; исполн. Л.И. Лавриненко [и др.]. – Х., 2007. – 14 с. – № 3451. – Инв. №°4/30902.

4. Хмельницкая АЭС Энергоблоки № 3, 4 Обследование и оценка технического состояния водохранилища-охладителя для подготовки строительства энергоблоков: Технический отчет / ОАО "Киевский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "ЭНЕРГОПРОЕКТ"; рук. В.Н. Чернавский; исполн. В.Я. Шендерович [и др.]. – К., 2008 – 45 с. – № 43-613.216.001.ОТ00. – Инв. № 42486 – в.

5. Хмельницкая АЭС. Характеристика района и площадки АЭС. – Т. 2. – Гл. 2: Окончательный отчет по Анализу безопасности / ОАО «Киевский научно исследовательский и проектно-конструкторский институт "ЭНЕРГОПРОЕКТ"»; рук. В.Н. Чернавский; исполн. В.Я. Шендерович [и др.]. – К., 2005 – 209 с. – № 43-923.203.254.ОБ.02.РЕД.1.Ф.

Надійшла до редакції 05.06.2013 р.