

АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА В ВОДОЕМАХ-ОХЛАДИТЕЛЯХ АЭС

Докт. техн. наук, проф. ПРЯШНИКОВ Ф. Д.,
аспиранты БЕЙНЕР Н. В., БЕЙНЕР П. С.

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

E-mail: Beyner@list.ru

ANALYSIS OF WATER MOVEMENT MANAGEMENT FOR WATER COOLING RESERVOIRS AT NUCLEAR POWER PLANTS

PRYSHNICOV F. D., BEYNER N. V., BEYNER P. S.

Sevastopol National University of Nuclear Power and Industry

Проведен анализ эффективности использования водоемов-охладителей в зависимости от их геометрической конфигурации (формы) и особенностей организации движения потока циркуляционных вод с использованием наглядного графического материала.

Ключевые слова: водоемы-охладители, движение потока, схема циркуляции.

Табл. 4. Библиогр.: 7 назв.

The paper contains an analysis for efficiency of water cooling reservoirs depending on their geometrical configuration (shape) and specific features concerning management of circulating water movement while using visual graphic material.

Keywords: water cooling reservoirs, water movement, circulation scheme.

Tab. 4. Ref.: 7 titles.

Эффективность охлаждения воды в водоеме-охладителе, а следовательно, и его гидротермический режим напрямую зависят от схемы организации движения потока, которая должна обеспечивать наиболее низкие температуры охлажденной воды при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах [1]. В статье проведен анализ эффективности использования водоемов-охладителей в зависимости от их геометрической конфигурации (формы) и особенностей организации движения потока циркуляционных вод с использованием наглядного графического материала.

Под водоемом-охладителем следует понимать естественное или искусственное углубление в земной поверхности, заполненное бессточной или слабо проточной водой, предназначенной для охлаждения нагретой циркуляционной воды в системах оборотного водоснабжения АЭС. Водоемы-охладители обеспечивают в течение всего года более низкие температуры охлаждающей воды, чем брызгальные бассейны и градирни с естественной тягой, а в зимние и весенне-осенние месяцы – даже более низкие температуры, чем вентиляторные градирни. Так как водоемы-охладители являются одновременно регуляторами поверхностного стока, они могут обеспечить надежное оборотное водоснабжение АЭС даже при незначительных водных ресурсах.

Наличие водоема-охладителя исключает необходимость подачи воды на значительную высоту (как, например, в градирнях), что сокращает расход электроэнергии на привод циркуляционных насосов. Недостаток –

сравнительно низкая удельная теплоотдача с его поверхности, требующая создания значительной площади зеркала водоема [2].

Место расположения водосбросных и водозаборных сооружений, а также сооружений, увеличивающих активную зону водоема (струераспределительных и струенаправляющих сооружений), выбирают исходя из условий получения необходимой площади активной зоны на основе технико-экономических расчетов. Классификация водоемов-охладителей по характеру геометрической конфигурации (формы) и особенностям схемы использования водоемов различных типов дана в табл. 1–4, где также приведены типичные значения показателей эффективности схемы использования, которые могут быть применены для приближенной оценки температуры охлажденной циркуляционной воды.

Чтобы оценить температуру охлажденной циркуляционной воды на основе решения уравнения теплового баланса, необходимо применять один из двух показателей эффективности схемы использования водоема-охладителя – параметр распределения температуры Π_T или коэффициент использования $K_{исп}$ [3].

При существенных изменениях условий теплообмена водоема-охладителя с атмосферой следует использовать параметр Π_T , который отражает снижение температуры охлажденной циркуляционной воды относительно среднего температурного уровня в водоеме-охладителе и определяется формулой

$$\Pi_T = \frac{T_s - T_{заб}}{\Delta T}, \quad (1)$$

где Π_T – параметр распределения температуры; T_s – средняя по свободной поверхности (среднеповерхностная) температура водоема-охладителя, °С; $T_{заб}$ – температура воды на водозаборе АЭС, °С; ΔT – температурный перепад водоема-охладителя, °С.

Коэффициент использования $K_{исп}$ вводится исходя из сопоставления рассматриваемого реального водоема-охладителя и эквивалентного ему по охлаждающей способности условного прямоугольного водоема с плоскопараллельным течением.

Коэффициент использования водоема-охладителя определяется отношением площадей условного и реального водоемов

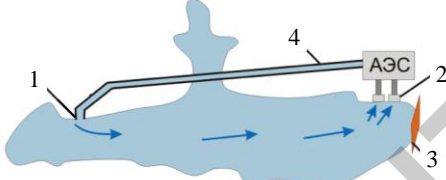
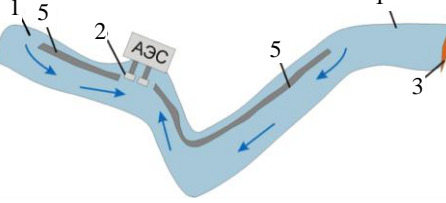
$$K_{исп} = \frac{\Omega_{акт}}{\Omega}, \quad (2)$$

где $\Omega_{акт}$ – активная площадь водоема-охладителя, м²; Ω – площадь свободной поверхности водоема-охладителя, м².

При проектировании конкретных объектов показатели Π_T и $K_{исп}$ определяются на основании результатов математического или физического моделирования гидротермических процессов в водоеме-охладителе для различных ветровых условий. В табл. 1–4 данные показатели представлены при благоприятных и неблагоприятных направлениях ветра. Под благоприятным подразумевается направление от водозабора против движения транзитного потока, под неблагоприятным – к водозабору.

Таблица 1

Схемы организации движения потока в вытянутых узких водоемах-охладителях

Особенность схемы использования водоемов-охладителей	Схема использования вытянутых узких водоемов-охладителей ($W/L < 0,2$)												
<p>С продольным направлением потока. Водовыпуск и водозабор размещены в противоположных концах водоема. Сброс теплой воды от конденсаторов турбин осуществляется в одном конце водоема, обычно в более мелководном, а забор охлажденной воды – в противоположном, в наиболее глубоководной его части</p> <p>Эффективность использования водоема-охладителя</p> <table border="1" data-bbox="319 645 782 795"> <thead> <tr> <th colspan="2">При штиле и благоприятных направлениях ветра</th> <th colspan="2">При неблагоприятных направлениях ветра</th> </tr> <tr> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,27</td> <td>0,82</td> <td>0,20</td> <td>0,75</td> </tr> </tbody> </table>	При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра		P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$	0,27	0,82	0,20	0,75	
При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра											
P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$										
0,27	0,82	0,20	0,75										
<p>С продольным направлением потока в одной части водоема и застойной зоной в другой. Водовыпуск и водозабор расположены так, что зона циркуляции занимает только часть площади водоема</p> <p>Эффективность использования водоема-охладителя</p> <table border="1" data-bbox="319 1003 782 1153"> <thead> <tr> <th colspan="2">При штиле и благоприятных направлениях ветра</th> <th colspan="2">При неблагоприятных направлениях ветра</th> </tr> <tr> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,20</td> <td>0,75</td> <td>0,02</td> <td>0,57</td> </tr> </tbody> </table>	При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра		P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$	0,20	0,75	0,02	0,57	
При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра											
P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$										
0,20	0,75	0,02	0,57										
<p>С продольным направлением потока. Водовыпуски размещены в противоположных концах водоема, а водозабор – в средней его части. Сброс теплой воды осуществляется в обе стороны от промплощадки, а забор охлажденной воды – из нижних слоев в районе промплощадки, если позволяют глубины водоема</p> <p>Эффективность использования водоема-охладителя</p> <table border="1" data-bbox="319 1456 782 1612"> <thead> <tr> <th colspan="2">При штиле и благоприятных направлениях ветра</th> <th colspan="2">При неблагоприятных направлениях ветра</th> </tr> <tr> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,27</td> <td>0,82</td> <td>0,20</td> <td>0,75</td> </tr> </tbody> </table>	При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра		P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$	0,27	0,82	0,20	0,75	 <p>1, 2 – водовыпускное и водозаборное сооружения; 3 – плотина; 4 – отводящий канал; 5 – струенаправляющее сооружение</p>
При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра											
P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$										
0,27	0,82	0,20	0,75										

Если водоем-охладитель вытянутый и широкий ($0,2 < W/L < 0,5$), тогда возможно расположение водосбросных и водозаборных сооружений в непосредственной близости к району промплощадки. Сооружения в этом случае делят разделительными или струенаправляющими дамбами. В зависимости от конкретных условий, в этой схеме может быть одно- или двусторонний выпуск воды (табл. 2). Данная схема расположения водосбросных и водозаборных сооружений позволяет значительно сократить длину сбросных каналов [4].

Таблица 2

Схемы организации движения потока в вытянутых широких водоемах-охладителях

Особенность схемы использования водоемов-охладителей	Схема использования вытянутых широких водоемов-охладителей ($0,2 < W/L < 0,5$)												
<p>С продольным направлением потока. Водовыпуск и водозабор размещены в противоположных концах водоема</p> <p>Эффективность использования водоема-охладителя</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">При штиле и благоприятных направлениях ветра</th> <th colspan="2">При неблагоприятных направлениях ветра</th> </tr> <tr> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,25</td> <td>0,80</td> <td>0,12</td> <td>0,67</td> </tr> </tbody> </table>	При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра		P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$	0,25	0,80	0,12	0,67	
При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра											
P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$										
0,25	0,80	0,12	0,67										
<p>С продольным или круговым направлением потока. Водозабор и водовыпуск расположены в средней части водоема</p> <p>Эффективность использования водоема-охладителя</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">При штиле и благоприятных направлениях ветра</th> <th colspan="2">При неблагоприятных направлениях ветра</th> </tr> <tr> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,12</td> <td>0,67</td> <td>0,05</td> <td>0,60</td> </tr> </tbody> </table>	При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра		P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$	0,12	0,67	0,05	0,60	
При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра											
P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$										
0,12	0,67	0,05	0,60										
<p>С продольным направлением потока. Водовыпуски размещены в противоположных концах водоема, а водозабор – в средней части водоема</p> <p>Эффективность использования водоема-охладителя</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">При штиле и благоприятных направлениях ветра</th> <th colspan="2">При неблагоприятных направлениях ветра</th> </tr> <tr> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,17</td> <td>0,72</td> <td>0,05</td> <td>0,60</td> </tr> </tbody> </table>	При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра		P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$	0,17	0,72	0,05	0,60	<p>1, 2 – водовыпускное и водозаборное сооружения; 3 – плотина; 4 – отводящий канал; 5 – подводящий канал; 6 – струенаправляющее сооружение</p>
При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра											
P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$										
0,17	0,72	0,05	0,60										

При конфигурации водоема-охладителя, близкой к кругу ($0,5 < W/L < 1,0$), целесообразно сброс теплой воды от конденсаторов турбин направить по касательной к береговой линии, а забор охлажденной воды осуществлять из центральной части водоема (круговоротная схема). Циркуляция водного потока в водоеме-охладителе в этом случае происходит по спирали с центром вращения в районе водозаборного сооружения и имеет устойчивый характер (табл. 3) [5].

Объемная схема циркуляции потока в водоеме-охладителе основывается на явлении температурной (плотностной) стратификации потока [6]. Сброс теплой воды в этом случае осуществляется в районе промплощадки в верхний теплый слой (эпилимнион) водоема с минимальными скоростями

ми, а забор охлажденной воды выполняется из придонного холодного слоя (гиполимниона). При этом в районе водовыпуска образуется наиболее устойчивая плотностная стратификация с максимальным градиентом температур, а это позволяет расположить водозаборные сооружения вблизи водовыпуска или осуществить совмещение этих сооружений в один узел (табл. 4).

Таблица 3

**Схемы организации движения потока
в водоемах-охладителях округлой формы**

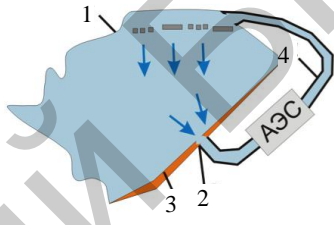
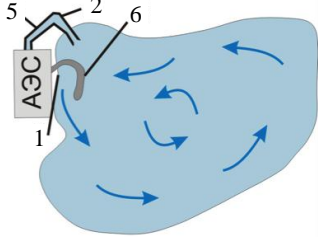
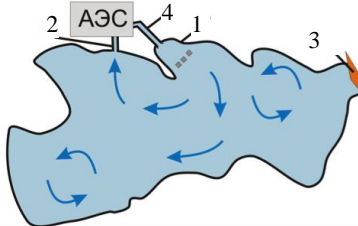
Особенность схемы использования водоемов-охладителей	Схема использования водоемов-охладителей правильной или неправильной округлой формы ($0,5 < W/L < 0,1$)												
<p>С поперечным направлением потока. Водовыпуск и водозабор размещены на противоположных берегах водоема</p> <p align="center">Эффективность использования водоема-охладителя</p> <table border="1" data-bbox="341 887 839 1052"> <thead> <tr> <th colspan="2">При штиле и благоприятных направлениях ветра</th> <th colspan="2">При неблагоприятных направлениях ветра</th> </tr> <tr> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,22</td> <td>0,77</td> <td>0,10</td> <td>0,65</td> </tr> </tbody> </table>	При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра		P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$	0,22	0,77	0,10	0,65	
При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра											
P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$										
0,22	0,77	0,10	0,65										
<p>С круговым направлением потока, формируемым струенаправляющими дамбами. Водовыпуск и водозабор прилегают к АЭС</p> <p align="center">Эффективность использования водоема-охладителя</p> <table border="1" data-bbox="319 1245 861 1411"> <thead> <tr> <th colspan="2">При штиле и благоприятных направлениях ветра</th> <th colspan="2">При неблагоприятных направлениях ветра</th> </tr> <tr> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,30</td> <td>0,85</td> <td>0,20</td> <td>0,75</td> </tr> </tbody> </table>	При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра		P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$	0,30	0,85	0,20	0,75	
При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра											
P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$										
0,30	0,85	0,20	0,75										
<p>С круговым направлением потока и застойными зонами. Водовыпуск и водозабор расположены вблизи АЭС</p> <p align="center">Эффективность использования водоема-охладителя</p> <table border="1" data-bbox="319 1603 861 1769"> <thead> <tr> <th colspan="2">При штиле и благоприятных направлениях ветра</th> <th colspan="2">При неблагоприятных направлениях ветра</th> </tr> <tr> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> <th>P_T</th> <th>$K_{исп}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,27</td> <td>0,82</td> <td>0,12</td> <td>0,67</td> </tr> </tbody> </table>	При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра		P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$	0,27	0,82	0,12	0,67	 <p>1, 2 – водовыпускное и водозаборное сооружения; 3 – плотина; 4 – отводящий канал; 5 – подводящий канал; 6 – струенаправляющее сооружение</p>
При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра											
P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$										
0,27	0,82	0,12	0,67										

Схема организации движения потока в водоемах-охладителях с глубинным водозабором

Особенность схемы использования водоемов-охладителей		Схема использования водоема-охладителя с глубинным водозабором													
<p>Водоем-охладитель любой конфигурации со средней глубиной не менее 5 м. Выпуск подогретой воды осуществляется на мелководный участок или через струераспределительное устройство, отбор воды – из нижних слоев водоема глубинным водозаборным сооружением</p> <p align="center">Эффективность использования водоема-охладителя</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th align="center" colspan="2">При штиле и благоприятных направлениях ветра</th> <th align="center" colspan="2">При неблагоприятных направлениях ветра</th> </tr> <tr> <th align="center">P_T</th> <th align="center">$K_{исп}$</th> <th align="center">P_T</th> <th align="center">$K_{исп}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td align="center">0,27</td> <td align="center">0,82</td> <td align="center">0,12</td> <td align="center">0,67</td> </tr> </tbody> </table>		При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра		P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$	0,27	0,82	0,12	0,67	<p>1, 2 – водовыпускное и водозаборное (глубинное) сооружения; 3 – плотина</p>	
При штиле и благоприятных направлениях ветра		При неблагоприятных направлениях ветра													
P_T	$K_{исп}$	P_T	$K_{исп}$												
0,27	0,82	0,12	0,67												

Для создания объемной циркуляции воды необходимо организовать прием воды только из глубинных слоев водохранилища, а нагретую воду сбрасывать на поверхность водохранилища с малыми скоростями. При этом нагретая вода, имеющая меньшую плотность, чем холодная, растекается по поверхности водохранилища и, охлаждаясь, переходит в глубинные слои, которые движутся к водоприемным сооружениям. Такая схема циркуляции позволяет отказаться от длинных отводящих каналов и струенаправляющих сооружений при высоком коэффициенте использования площади водохранилища [7].

ВЫВОД

Водоемы-охладители, обладая техническими и экономическими преимуществами по сравнению с другими охладителями АЭС (например, брызгальный бассейн или градирни), являются наиболее эффективными. Так, наличие водоема-охладителя на АЭС исключает необходимость подачи воды на значительную высоту (как, например, в градирнях), что сокращает расход электроэнергии на привод циркуляционных насосов. В настоящее время существуют три основные схемы циркуляции воды в водоемах-охладителях, которые определяют организацию движения потока по акватории, а именно: транзитная, круговоротная (без учета стратификации в водоеме) и объемная (с учетом стратификации). Основываясь на модельных и натурных исследованиях, которые были проведены на эксплуатируемых объектах, можно сделать выводы, что организация движения потока по объемной схеме позволяет наиболее эффективно использовать площадь водоема-охладителя для охлаждения воды. Кроме того, данная схема применима при любой конфигурации водоема, а расположение водозаборных сооружений вблизи водовыпуска или совмещение этих сооружений в один узел ведет к значительной экономии капитальных затрат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назначение и особенности условий работы водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций / Л. Н. Антонова [и др.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Вып. 2/10 (56). – С. 56–63.
2. Большая советская энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.
3. Суздалева, А. Л. Структура и экологическое состояние природно-техногенных систем водоемов-охладителей АЭС: дис. ... канд. техн. наук: 03.00.16: защищена 05.26.02: утв. 10.01.03 / А. Л. Суздалева. – М., 2002. – 515 с. – Библиогр.: с. 38–40. – 47:05-5/37-6.
4. Техноэкосистема АЭС. Гидробиология, абиотические факторы, экологические оценки / А. А. Протасов [и др.]. – Киев: Ин-т гидробиологии НАН Украины, 2011. – 234 с.
5. Методические указания по технологическим расчетам водоемов / А. С. Соколов [и др.]. – СПб.: ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева, 2004. – 54 с.
6. Абрамов, Н. Н. Водоснабжение: учеб. для вузов / Н. Н. Абрамов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1974. – 480 с.
7. Шеренков, И. А. Результаты натурных и модельных исследований водохранилищ-охладителей Луганской ГРЭС / И. А. Шеренков, А. И. Семьян // Труды коор. совещ. по гидротехнике. – Вып. 32: Модельные и натурные исследования водохранилищ-охладителей / ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева. – Л.: Энергия, 1967. – С. 235–245.

REFERENCES

1. Purpose and Peculiar Features of Operational Conditions of Water Cooling Reservoirs at Thermal and Nuclear Power Plants / L. N. Antonova [et al.] // East-European Journal of Advanced Technologies. – 2012. – Issue 2/10 (56). – P. 56–63.
2. Great Soviet Encyclopedia. – M.: Sovetskaya Entsiklopedia (Soviet Encyclopedia), 1969–1978.
3. Suzdaleva, A. L. Structure and Ecological State of Natural and Technogenic Systems of Water Cooling Reservoirs at Nuclear Power Plants: Dissertation, ... PhD (Engineering): 03.00.16: Defended on 05.26.02: Approved on 10.01.03 / A. L. Suzdaleva. – M., 2002. – 515 p. – Reference List: p. 38–40. – 47:05-5/37-6.
4. Techno-Ecosystem of Nuclear Power Plant (NPP). Hydrobiology, Abiotic Factors, Ecological Evaluations / A. A. Protasov [et al.]. – Kiev: Institute of Hydrobiology NAS of Ukraine, 2011. – 234 p.
5. Methodological Recommendations on Technological Calculations of Water Reservoirs / A. S. Sokolov [et al.]. – Saint-Petersburg: VNIIG named after B. E. Vedeneev, 2004. – 54 p.
6. Abramov, N. N. Water Supply: Manuel for HEIs / N. N. Abramov. – 2nd Edition, Revised and Enlarged. – M.: Stroyizdat, 1974. – 480 p.
7. Sherenkov, I. A. Results of Field Observations and Model Investigations of Water Cooling Reservoirs at the Lugansk GRES Power Plant / I. A. Sherenkov, A. I. Semian // Proceedings of Coordinating Meeting on Water Engineering. – Issue 32: “Model and Field Investigations of Water Cooling Reservoirs” / VNIIG named after B. E. Vedeneev. – L.: Energia [Energy], 1967. – P. 235–245.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 25.03.2013